

日本フルードパワーシステム学会誌

JOURNAL OF THE JAPAN

FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

フルードパワー システム

Nov.2014 Vol.45 No.6

日本フルードパワーシステム学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

特集「アディティブ・マニファクチャリング」

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目 次

特集「アディティブ・マニファクチャリング」

【巻頭言】

「アディティブ・マニファクチャリング」の発行にあたって	吉満 俊拓	256
-----------------------------	-------	-----

【総論】

積層造形技術	徳永 剛	257
--------	------	-----

【解説】

ファブラボの活動とその広がり	門田 和雄	262
3Dプリンティングを活用した実習系授業の取り組み	松本 大樹	265
中小企業における3Dプリンタ活用の可能性	福岡新五郎	268
RP造形機によるシェル鋳型の超短納期製作について	高橋 啓二	273

【会議報告】

ROBOMECH2014におけるフルードパワー技術研究動向	早川 恭弘	276
ACTUATOR14におけるフルードパワー技術研究	吉田 和弘	278
FPNI 第8回 Ph.Dシンポジウムにおけるフルードパワー技術の研究動向	一柳 隆義	280

【教室】

入門講座「トライボロジー」第3回：摩耗について	風間 俊治	282
-------------------------	-------	-----

【トピックス】

特許文献を調べる・特許電子図書館の活用5…類似文献の検索1	木原 和幸	285
英国駐在記	山田 宏昭	288

【研究室紹介】

九州工業大学 田中・刈脇・清水研究室	嶋田 愛子	291
--------------------	-------	-----

【企画行事】

平成26年春季フルードパワーシステム講演会報告	加藤 友規	294
-------------------------	-------	-----

【コーヒーブレイク】

手押し消防ポンプ しくみ編	大橋 彰	296
---------------	------	-----

【会告】

共催・協賛行事のお知らせ		299
平成26年度ウインターセミナーのお知らせ		
「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」		300
資料一覧		301
フルードパワーシステム第45巻総目次		304
その他	297, 298, 300, 306	

■表紙デザイン：山本 博勝 株豊島

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "Additive Manufacturing"

[Preface]

Editor's Prefatory Note for Additive Manufacturing	Toshihiro YOSHIMITSU	256
--	----------------------	-----

[Survey]

Additive Manufacturing Technology	Tsuyoshi TOKUNAGA	257
-----------------------------------	-------------------	-----

[Review]

Activity of Fablab and the Expansion	Kazuo KADOTA	262
Approaches to Practical Subjects with 3D Printing Technique	Hiroki MATSUMOTO	265
Potential of the 3D Printer Utilization in the Small and Medium-sized Business	Singoro FUKUOKA	268
Case Studies of Shell Molding by the Three-dimensional Layered Manufacturing System	Keiji TAKAHASHI	273

[Conference Report]

Technical Research Trend of the Fluid Power in ROBOMECH2014	Yasuhiro HAYAKAWA	276
Researches of Fluid Power Technologies in ACTUATOR14	Kazuhiro YOSHIDA	278
A Research Trend of Fluid Power Technology in the 8th FPNI Ph. D Symposium on Fluid Power	Takayoshi ICHIYANAGI	280

[Lecture]

An Introductory Course of Tribology: 3. On Wear	Toshiharu KAZAMA	282
---	------------------	-----

[Topics]

Investigation of the Patent Documents/ Practical use of Industrial Property		
Digital Library...Search 1 of Similar Patent Documents	Kazuyuki KIHARA	285
Life in UK	Hiroaki YAMADA	288

[Laboratory Tour]

K.Tanaka, M.Fuchiwaki & F.Shimizu Lab. in Kyusyu Institute of Technology	Aiko SHIMADA	291
--	--------------	-----

[JFPS Activities]

A Report of Spring Conference of Japan Fluid Power System Society 2014	Tomonori KATO	294
--	---------------	-----

[Coffee Break]

Firefighting Arm Pump; The structure	Akira OHASHI	296
--------------------------------------	--------------	-----

[JFPS News]

297, 298, 299, 300, 301, 304, 306

「アディティブ・マニファクチャリング」の 発行にあたって

著者紹介



よし みつ とし ひろ
吉 満 俊 拓

神奈川工科大学
神奈川工科大学創造工学部
〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030
E-mail : yosimitu@rm.kanagawa-it.ac.jp

2000年明治大学大学院博士後期課程修了。同年神奈川工科大学工学部助手。現在は准教授。空気圧制御システムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。博士（工学）

アディティブ・マニファクチャリングは、3D-CAD モデルデータから樹脂・金属粉末などの素材を積層して物体を形成する技術である。従来からラピッドプロトタイプング技術として知られているが、近年成形が難しかった素材（金属など）や複雑な形状や構造の製品をより簡単に安価に製造できるようになった。また、1988年に3DプリンタメーカーのStratasys社が開発し特許を取得したシステムである熱溶解積層法が2009年に特許が切れたことも重要な要因である。熱溶解積層方式とは細い樹脂ワイヤを溶融させて積層する造形法で、特許が切れるまでは3Dプリンタは数百万円もしたため、一般市民が入手することはほぼ不可能だったが、特許が切れたことで数万円の3Dプリンタも数多く登場し、一気にホームユースの低価格機器が普及した。その結果、マスコミまでも3Dプリンタとして取り上げ、一般にも非常に注目されている。この技術はあらゆる産業で活用可能であり多岐にわたる応用が期待される。

本特集号では、産学分野にとらわれず、アディティブ・マニファクチャリングを取り扱う幅広い分野からの話題・トピックを提供する。フルードパワーの新たな研究・開発の領域を拡大するきっかけとなれば幸いである。

まず、アディティブ・マニファクチャリングについての総論として積層造形技術の概略・歴史的

経緯と現状、高強度立体生成のための研究事例について解説いただいた。

つぎに、「ファブラボ活動」について解説いただいた。

学内外におけるデジタル・ファブリケーションに取り組み、ファブラボのネットワークとその広がりについて、紹介されている。

ファブラボ活動は学内に限られておらず、一般市民に開かれていることなどが3Dプリンタというキーワードがマスメディアでも取り上げられるようになった一因と考えられる。

つぎに、大学における活用事例として実習系授業の取り組みについて解説いただいた。さまざまなものづくりのアイデアを3Dプリンタ・3Dプロッタを用いて容易に実体化する手法として活用されている。大学教育におけるPBL（Project Based Learning）教育への活用事例として大変興味深い試みである。

つぎに中小企業における活用の可能性について解説いただいた。熱溶解積層造形法についての解説および3D造形法の歴史（失敗と進化）について、事例の紹介を織り交ぜながら紹介されている。

最後に産業界における活用事例として、粉末レーザー焼結型ラピッドプロトタイプング技術を用いてシェルモールド用の砂を直接レーザーで焼成し、鋳型を金型なしで製作する事例を紹介いただいた。

本特集号では、フルードパワーシステム関係者のほかに、各分野の専門家に記事を執筆いただいている。ご多忙にもかかわらずご執筆いただいた皆様に心よりお礼を申し上げます。

なお本特集号は、著者のほか、五嶋裕之氏（機械振興協会）、加藤友規氏（福岡工業大学）の各編集委員からなるワーキンググループにより企画・構成された。

（原稿受付：2014年8月27日）

積層造形技術

著者紹介



とく なが つよし
徳 永 剛

千葉工業大学工学部
〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1
E-mail: tokunaga.tsuyoshi@p.chibakoudai.jp

1986年東京農工大学大学院修士課程修了。旭化成工業、職業能力開発総合大学校を経て、2005年千葉工業大学工学部准教授、現在に至る。レーザ加工、積層造形の研究に従事。精密工学会会員、レーザ協会理事、技能五輪 精密機器組み立て職種 競技委員、博士（工学）。

1. はじめに

最近3Dプリンティング技術が各方面で注目されている。この技術は名前こそ最近話題になってはいるが、数年前まではラピッドプロトタイピングとか積層造形などと呼ばれ、それなりの進化を続けてきた。特に実物の立体が望まれる設計分野では出力端末としてコンピューターームなどに整備されている会社も一般的になっている。最近になってこの技術が呼び名を改めて注目されたのはいくつかの要因がある。まず2013年2月のアメリカ合衆国大統領の一般教書演説¹⁾で登場したことが挙げられよう。インターネット版では開始から1/4ほどの時点で3Dプリンタが登場している。米国では3Dプリンティングを将来重要な製造技術として位置付け、2012年から技術者を育成する施設を立ち上げ注力していること述べている。また書籍“MAKERS-21世紀の産業革命が始まる”²⁾では3Dプリンタなどの利用で立体を生成するという行為が誰にでもできる身近な存在になったことが指摘されている。さらに2009年に熱溶解積層方式（FDMとも呼ばれる）の特許が切れたことも重要な要因である。熱溶解積層方式とは細い樹脂ワイヤを溶融させて積層する造形法で、複数の企業で製品化され、10万円を切る価格で販売されるようになってきている。本稿では層状に積み重ねて立体を生成する技術を総じて扱うこととし、技術の概略、歴史的経緯と現状、高強度立体生成のための研究事例などについて述べる。

2. 積層造形の仕組みと特徴

積層して立体化する手法をもう少し正確に表現すると、目的形状を薄くスライスして断面に分解し、何らかの材料でこれらの断面を底面から生成しつつ同時に下層と結合させ、全断面を積み上げることで立体を生成する加工法になろう。図1に積層造形の概略を示す。加工法自体は特段目新しいようには見えないが、1層を薄く、しかもすべての工程を自動化することが価値のある技術に値する。

積層造形法の最大の特徴はあらゆる形状の立体を自動で生成可能なことである。図2に特徴を表した製作例を示す。先がすばまった筒状、中空はもちろんのこと、従来の加工では1つの立体では困難な形状（たとえば冷却配管が組み込まれた樹脂成型用金型）や、幾何学的ではない形状（たとえば骨）、複数のパーツが組合って可動部を有するユニットも1品物として生成できる。このような特色を実現できるポイントは材料の付加によって、1方向からの加工でありながら層の表側と裏側を同時に生成するか

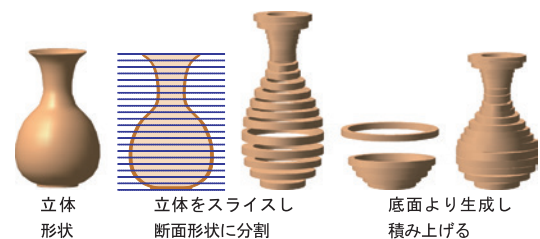
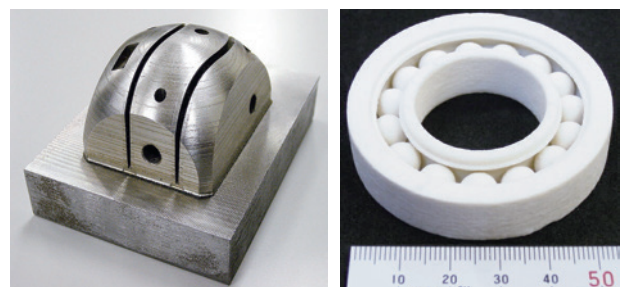


図1 積層造形の概要



a 深い溝のある金型（M社）
造形と切削を交合に実行
b 回転可能な軸受け組
み立てた状態で生成

図2 積層造形で実現できる立体の例

らである。切削加工では影になる部分は姿勢を変える必要がある。しかし積層造形法では影となる部分は層の裏面が形作るので形状に関する制限がない。

もう一つ特筆すべきは、造形装置の操作さえ知っていれば加工の知識や経験が無くても誰でも立体を得ることができる。造形装置は高度に自動化されたシステムである。NC工作機械も自動化された加工システムであることは間違いないが、相応の経験が不可欠である。この点、造形装置は基本的にはパソコンの操作で造形開始を指示すれば立体が生成される。すなわちカメラの画像をプリンタで印刷するのと同じ感覚で立体が得られる。

3. 積層造形の歴史

積層造形装置の起源は1980年の小玉秀男の発明³⁾と言われており⁴⁾、これには光硬化樹脂に紫外線を集光して走査する作業を層状に繰り返すことが示されている。最初の発明が日本人であったことは感慨深い。一方、1986年にJoseph J. BeamanらがSelective Laser Sinteringと呼ばれる金属粉末をレーザーで一体化する方法を開発した。レーザー焼結は一般的な焼結と異なり、レーザーの走査経路とその近傍にある粉末が熔融し気孔の多い凝固物になる。初期の金属造形では材料粉末は樹脂コーティングしてあり、接着剤としての機能を果たしていたが、今日では樹脂コーティングのない金属粉末を相応の強度で立体化できている。1990年代はさまざまな造形法と材料の組み合わせが研究され、裏面に接着剤のついた紙をカッターで切る・レーザーで焼き切る、石膏にインクジェットで水滴を吹き付ける、結合剤の着色による造形物のカラー化など、実に多くの造形装置が登場した。この当時が積層造形の最初の流行である。また、材料の開発以外にも造形物の形状精度・強度の向上についても開発が進められた。ラピッドプロトタイピングと呼ばれるように立体モデルを意識していたと思うが、ラピッドマニファクチャリング（製品として利用する）という意識も広まり、機械・電気・医療などさまざまな分野で使われるようになった。造形物は寸法を正確に実現することが難しかったが、造形と切削加工による輪郭仕上げを交合に行うアイデア⁵⁾が古くから提案されており、マシニングセンタに造形装置を組み込んだように見える機器も装置も市販されている。

4. 積層造形法の種類と特徴

米国ASTM標準化委員会では2009年にこの加工法を総じてAdditive Manufacturingと呼ぶことが定められた（以降AMと略記する）。この背景には装置

メーカーは造形方式の独自性を固有な名称でアピールすることがあり、一般的な名前と混乱することが見受けられていたのも事実で、何らかの系統立てが望まれていたことが考えられる。日本では特別な呼び名は制定されていないようであり、従来から使われている積層造形は加工方法の特徴を正しく表現している。本稿でも積層造形と記している。

さて、先述のAMは材料供給と一体化する部分の区分で3に大分類され、さらに工法により全7種類に細分化されている。大分類の視点は(1)供給した材料の一部を立体として一体化するのか（選択式固化方式）、(2)立体となる部分にのみ材料を供給しているか（選択的材料供給方式）であるが、(3)シート積層という一見すると(1)に含まれそうな区分もある。使用する材料の形態によって選択式固化方式と選択的材料供給方式は3種類のサブカテゴリがある。以下に大分類に沿って7種の概略をまとめる。

(1) 選択式固化方式

選択式固化方式の典型的な造形プロセスを図3に示す。この方式は材料供給と断面の固化の工程が分かれているのが特徴である。

①液槽光重合（Vat photopolymerization）は従来光造形法と呼ばれている形式で、材料の状態では液体の紫外線硬化樹脂を蓄えたタンクに造形テーブルとなるエレベータを備えている。1層ごとにエレベータを沈めては引き上げる動作で材料を1層分である10 μ mオーダの厚さに供給する。そして立体の断面形状となる部分に紫外線レーザーを走査する。紫外線を照射された部分は重合反応を起こし硬化する。これらの動作を繰り返すことで立体を生成する。最初に造形テーブルを沈める液槽に高額な樹脂材料を満たさなければならないが、普段は減った分を継ぎ足せばよい。ビーム走査については収束性に優れた紫外レーザー、ガルバノミラー式スキャニング装置とf θ レンズの組み合わせが高速走査を実現できる。

つぎの②と③は材料として粉末を使用し、薄く平

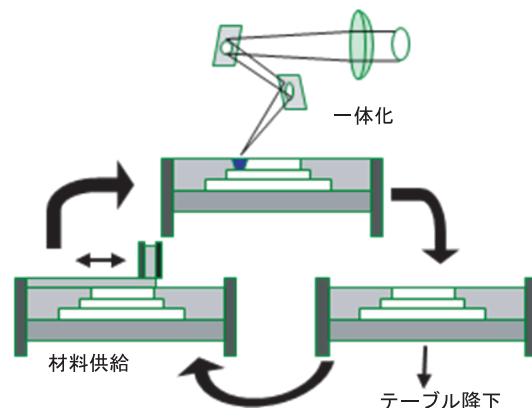


図3 選択式固化方式の例

坦に供給するという点は同じであるが、一体化する際の粉末粒子の結合方法が異なっている。選択式固化方式で粉末を用いる場合の特徴として、生成している立体の周囲に未使用の材料が存在することが挙げられる。特にオーバハングした部分はこれら未使用材が支えとなるので、積層方向から見て、下層からの連続体がない形状でも造形できる。しかも未使用の材料は変質しなければ再利用できるケースが多い。

②粉末床熔融結合 (Powder bed fusion) は、樹脂や金属など材料粉末そのものをレーザーや電子ビームで加熱熔融させ一体化する方式である。高強度の立体を生成するのに向いている。ポーラスな生成物になりやすいが、造形条件を適切に設定することで密度を高めることができるようになった。

③結合剤噴射 (Binder jetting) はインクジェットプリンタのインクヘッド技術を用いて材料粉末を結合する液体を吹き付ける方式である。石膏粉末と水や、小麦粉に糊などの組合せがある。着色剤を混ぜてカラーの立体を生成できる装置も市販されている。

(2) 選択的材料供給方式

この種の特徴は立体となる部分にのみ材料を供給することであり、代表して後述⑤の造形状態を図4に示す。立体のオーバハングする部分は下方にサポートと呼ばれる支えが必要となる。図5は造形物裏面に配置したサポートを除去する例である。サポートは造形後に剥離可能か、専用の薬液に浸けると溶解するような材料である。

④材料噴射 (Material jetting) もインクジェット方式であるが、こちらは噴出物が材料液滴であるところが③と異なる。紫外硬化樹脂を吹き付け直後に紫外線照射で硬化させる。同じ材料を使う①液槽光重合と対比すると方式の違いが明瞭になる。インクジェット方式はコンパクトなタンクに実質的に立体になる部分の材料だけ供給するので、①のように最初に大量の材料を準備する必要はない。また紫外線の光源もインクジェット方式はヘッドの側方にランプ・LEDで安価にできる。①では光を細く集光する必要があるため、レーザー以外の光源が見つからない。さらに光学系もインクジェット方式は噴射ノズルがどの部分に材料を供給するかの役割を果たすことで、複雑な光学系を全廃できる。反面、ヘッドの機械的な動きで層を形成するのでガルバノスキャナに比べ時間を要する。性能面では造形能力が劣っているということはない。図6は0.6mmの幅の垂直壁を生成した例で積層方向でも平坦な面が生成できている。

⑤指向性エネルギー堆積 (Directed energy deposi-

tion) は微小サイズの溶射である。集光するレーザーの外周から材料粉末をガス流に載せて搬送し、粉末が光軸を横切る位置と材料表面および焦点位置を一致させることで熔融した状態で吹き付ける。この時堆積する面も加熱されるので高密度で強固な立体が生成できる。しかし堆積させる相手材が必要なので、極端にオーバハングした形状は製作困難であるが、造形物の姿勢を変えて堆積が鉛直方向に調整することでこの問題を解消している装置もある。

⑥材料押出し (Material extrusion) は樹脂ワイヤを加熱して軟化した状態で細いノズルから造形テーブル上に押出す方式で、いわゆる3Dプリンタで採用されている。安価な材料と簡便なXYZ直交位置決め機構で構成されている。その一方で、高機能なモデルも存在する。それらでは特性の異なる材料が準備されており、目的に合わせて材料を選択することができるが、現時点では単一の造形物の局所的にいろいろな材料の部分ができるということではない。また材料に依存して物性値が異なることに起因して造形条件が技術的秘密になっており、材料と合わせて販売しているメーカーもある。

⑦シート積層 (Sheet lamination) は、紙や薄い樹脂シート、金属箔を材料として供給する方式である。材料供給時に一層分が一体化し断面形状にそって切断するだけでよいので造形時間の短縮になるが、中空形状などは内部の不要な材料が取り除けず生成

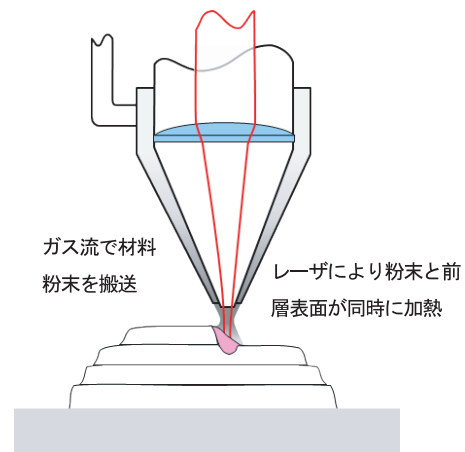


図4 選択式固化方式の例



図5 剥離可能なサポートの例 図6 厚さ0.6mmの垂直壁

できる形状に制限がある。紙や樹脂の場合は裏面に接着剤が塗布されており熱融着することで積層するが、この時全面を接着すると不要部との分離が困難になる。この点を考慮して切断する輪郭線に沿って接着剤が作用しない薬剤を塗るなどの処理の後に、つぎのシートを接着している。輪郭切断は1層分の厚さをカッターで切断している。カラー印刷するシステムでは立体（のイメージ）をコピーすることができる。また金属箔を超音波で接合する方式で積層し、切削加工で金属性の立体を生成するシステムもある。

5. 金属積層造形のトピック

積層造形法で迅速に材料強度に達する金属の立体を生成することはこの技術の目標であり、いろいろ試されてきた。指向性エネルギー堆積と粉末床溶融結合のどちらも一長一短があり解決すべき課題も異なるが、特に迅速さについては積層造形全般で高速化が望まれている。昨今の国家プロジェクトでは1時間当たり500mlという現在の約10倍に相当する目標値が示されている。複数台の造形ヘッドを並べるのも1つの解決策であろうが、何らかのブレークスルーが望まれる。笹原⁶⁾はアーク溶接を使ってNC制御しながら肉盛りする加工法を提案し高速造形の可能性を示唆している。迅速化は堆積速度だけでは解決しない。いかに最終形状に近い形にするかも重要である。これは直径の大きい工具の粗切削と似ている。溶融凝固で生成される形状は熱変形や表面張力の影響を受けるが、これらは目標形状より余剰に生成された部分に含まれることは都合がよい。しかし最終的に余剰部分は取り除くことが必要になる。

6. 積層造形における加工現象と金属高強度造形

筆者らはあらゆる形状生成が可能な選択式固化方式で、金属粉末を使い材料強度に至る立体の生成を試みてきた。形状の特徴は輪郭部分で付与されることを考えると、輪郭以外は厚い積層が迅速さに有利である。これは切削加工の粗加工と仕上げ加工の考え方と同じである。100Wクラスのレーザーで数100 μ mオーダの層を生成することは十分可能で、この値は一般的な造形厚さの10倍に相当する。しかも加工用レーザーの出力は数10kWを超える発振器が市販されており、レーザー出力は十分なゆとりがある。そこで金属・完全溶融・厚い積層・輪郭をキーワードに造形法を模索している。

厚層化の問題は、金属粉末を溶融して一体化の際、①粉末材料の上で（ポーラスな焼結体ではなく）薄板状の溶融凝固物が得られるか、②生成した断面要

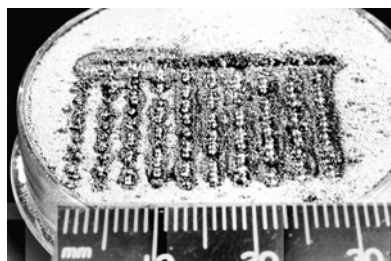


図7 鉄粉にレーザー照射して得られた球状の溶融凝固物

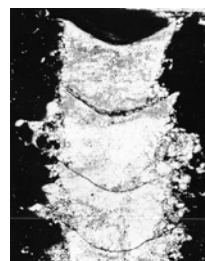


図8 積層間に残った境界

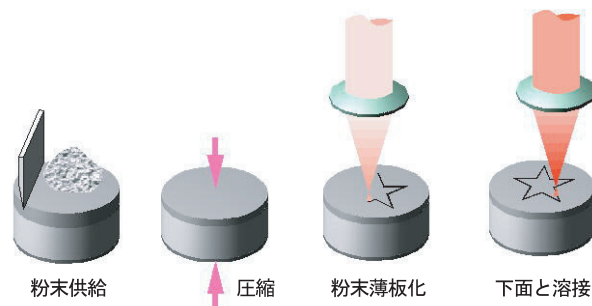


図9 材料強度の造形物を実現した2ステップレーザー照射法

素を造形途上の下層と溶融一体化できるかで、高強度実現では根本的な問題である。前者①は粉末と液体という表面張力の効果が強調される材料形態の組み合わせで、たとえば小麦粉などに水滴を滴下すると球状になることは日常生活で体験することである。粉の上に薄い水の層を作ることが困難のように、特段の措置を講じなければ溶融金属は球状になりポーラスな造形物になる。図7は純鉄粉上をレーザー走査した時の生成物で、材料は細かくて粒子が見えないが、溶融凝固物は球状に巨大化している。また後者②は薄板状の空孔の無い断面形状ができたとしても下層と溶融一体化しなければ十分な強度は望めないことを意味する。図8は板状積層物の断面で、外観からは一体化しているように見えても、金属組織レベルでは境界が存在し剥離の起点になる。この問題は材料である粉末は溶融凝固後の金属塊と比べ熱伝導がきわめて悪いことに起因する。中でも選択式固化方式では層の上方から加熱し、熱伝導の悪い粉末層を通して、裏面と接する熱伝導の良い金属塊表面まで溶融する必要がある。1層が薄く、溶融後に下層までレーザーが到達すれば走査間隔を密にする、あるいは複数回の走査で再溶融することが可能であろう。しかし層を厚くすると別の工夫が必要になる。

1層分作るというのを1層の粉末を溶融凝固することと、それを下層と溶融結合することの2つの工程に分解すると解決策が思いあたる。図9は選択式固化方式で、（筆者が）初めて造形物が材料強度に達した（鉄とチタンについて実施）造形法⁷⁾の1層分の工程である。この方法のポイントは2点あり、

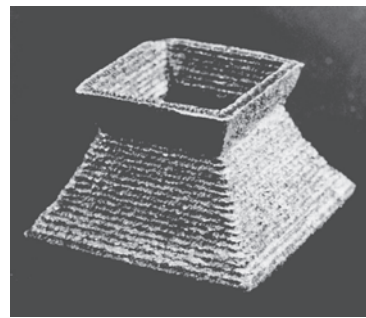
①材料供給時に粉末を圧縮することで球状化することなく熔融凝固できること、②粉末の薄板化と、積層である薄板状の断面と下層の造形物の結合を分けて適した条件で、すなわち1層につき2回レーザー照射したことである。最初の照射は粉末を一旦薄板にするが、下層表面の熱伝導では表面を熔融できるパワーには至っていない。そして2回目の照射では薄板と造形途上の熔融凝固物（金属塊）を溶接する。これにより粉末を完全に熔融一体化することができ、純鉄粉や純チタン粉で素材強度に達する引張り強度や造形物のどの位置でも均一な硬さ分布が得られた。図10は造形物の例で金属組織が連続している。この技術をベースに装置の大型化が懸念される圧縮成形を除くため、あらかじめ粉末材料をシート状に圧縮成型し、このシートを供給する方式⁸⁾や、粉末の圧縮をせずに完全熔融させ造形する3ステップレーザー照射法⁹⁾を提案した。図11はその1層分の工程である。図12は造形物の例で、aは圧縮成形シート方式、bは3ステップ法である。特にbは積層段差をレーザーアブレーションで斜面に生成した熔融金属を安定して薄板にするには照射点の到達温度を管理する必要¹⁰⁾があり、特にチタン材料を高密度で積層造形すること¹¹⁾や、輪郭形状の精度向上¹²⁾など課題も残っている。

7. おわりに

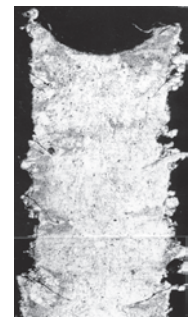
積層造形は優れた機能を有しているが、価値がある／なしは目的次第である。たとえば金型が必要な樹脂製品を数個作るような場合はきわめて有利である。高速造形の開発以外にも質的な向上として粉末から密度100%で相応の形状精度の立体を低価格の装置で提供できるようになることも有益であろう。特にチタンなどの難削材・高強度材料・貴金属などで立体を生成することはさまざまな利用が考えられ、社会に与える影響は計り知れない。画期的な方法が日本で生まれることを期待するとともに、今後も研究活動や市場の活性化が続くことを願っている。

参考文献

- 1) The 2013 state of the union address, <http://www.whitehouse.gov/state-of-the-union-2013>
- 2) クリス・アンダーソン：MAKERS—21世紀の産業革命が始まる、NHK出版、(2012)
- 3) 小玉秀男：立体図形作成装置、特願昭55-4820、(1980)
- 4) 北口秀美：光造形法の発明、<http://www.thagiwara.jp/rp/rp-history/kitaguchi.html>
- 5) M. Feygin：Laminated object manufacturing apparatus and method, US5876550 A, (1995)



a 造形サンプル



b 金属組織が連続

図10 2ステップレーザー照射法で生成した立体

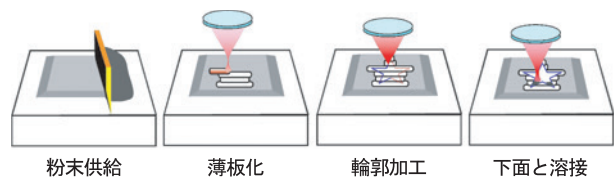
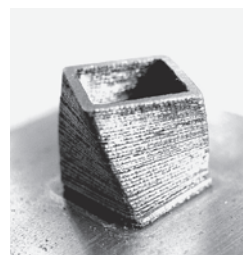
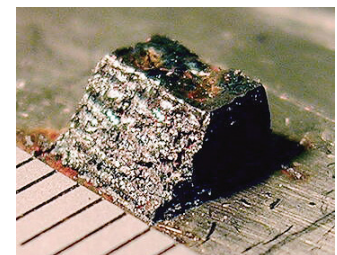


図11 オールレーザー厚層輪郭加工が特徴の3ステップレーザー照射法



a 圧縮成形シートをレーザーで熔融結合した造形物



b 積層段差を斜面に輪郭加工した立体（3ステップ法）

図12 造形サンプル

- 6) 笹原ら：熔融金属積層による傾斜壁の造形、日本機械学会誌論文（C編）、75, 757 pp. 2435-2439 (2009)。
- 7) 徳永ら：2ステップレーザー照射法による純鉄粉体材料を用いた3次元造形、精密工学会誌、第65巻第8号、pp. 1136-1140, (1999)
- 8) 山本圭治郎、徳永剛：積層造形方法及び積層造形装置、特許第4284321号、(2009)
- 9) 徳永剛、吉澤徹：積層造形方法、特許第4384420号、(2009)
- 10) 村瀬ら：金属粉末熔融型積層造形における薄板状の成特性、精密工学会秋大会講演論文集、(2012)
- 11) 横山ら：純チタン粉末を用いた積層造形の試み、精密工学会春大会講演論文集、(2014)
- 12) 熊谷ら：レーザー3次元形状加工における斜面生成第3報 数値計算による加工形状の予測、精密工学会秋大会講演論文集、(2013)

(原稿受付：2014年8月18日)

解説

ファブラボの活動とその広がり

著者紹介



かど た かず お
門 田 和 雄

東京工業大学附属科学技術高等学校
〒108-0023 東京都港区芝浦3-3-6
E-mail: kadota@hst.titech.ac.jp

2010年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。1993年より東京工業大学附属科学技術高等学校機械システム分野教諭。機械技術教育の実践と研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。FabLab関内Director。

1. はじめに

近年、3Dプリンタやレーザー加工機などを活用したものづくりを意味するデジタル・ファブリケーションという言葉をよく見聞きするようになり、各地にはそれらを活用できるものづくりの市民工房であるファブラボ（FabLab）が急増している。ファブラボとは、Fabrication（ものづくり）とFabulous（素晴らしい）の二つの意味が込められた造語であり、2002年にマサチューセッツ工科大学（MIT）で誕生した。MITのThe Center for Bits and Atomsには、個人ですべてを買い揃えるのは難しい多彩なデジタル工作機械が揃い、それを使って作業するスペースを確保し、作るための知識を交換したり共有したりできる物理的な空間がある。

ファブラボ誕生の背景となったのは、MITのニール・ガーシェンフェルド教授による人気講座「（ほぼ）何でもつくる方法（How to Make (Almost) Anything）」であり、この授業ではファブラボにおけるデジタル工作機器の利用法を教えるための演習が行われていた。その後、ニール教授が著書『ものづくり革命 パーソナル・ファブリケーションの夜明け』¹⁾でファブラボを紹介して以来、その考え方が急速に世界に広まり、世界中にファブラボが誕生していくことになる。

著者がファブラボを知ったのは2006年にたまたま書店で手に取った本書であった。MITでの興味深い試みとして熟読したが、当時はその後、自身が

ファブラボの運営に関わるとは考えてもいなかった。その後、本書はしばらく絶版が続いていたが、2012年に『Fab—パーソナル・コンピュータからパーソナル・ファブリケーションへ』²⁾として、オライリージャパンから復刊されたので、ファブラボに興味にある方には、ぜひご一読いただきたい。

著者は東京工業大学附属科学技術高等学校の機械システム分野の教員として、機械技術教育の実践と研究に従事している。本校にもここ数年で3Dプリンタやレーザー加工機などのデジタル工作機械が導入され、その指導法や有効活用を検討中である。工業高校の施設は、ファブラボと共通するものが多く、諸外国には学校内にファブラボがある事例も多い。

一方で著者は、2011年頃から日本におけるファブラボのネットワークであるFabLab Japan Networkのメンバーに加わり、日本において2011年5月に鎌倉と筑波で同時にオープンしたファブラボについても間近で見てきた。2013年8月、思いがけず、横浜にオープンしたファブラボ関内の運営にボランティアで関わるようになり、この間、毎年一回開催されている世界ファブラボ代表者会議にも三年連続で出席した。

このような経緯により、ここ数年間、学内・学外におけるデジタル・ファブリケーションに取り組み、ファブラボに関わってきたことを踏まえて、ファブラボのネットワークとその広がりについて、紹介する。

2. ファブラボについて

2.1 ファブラボの定義

ファブラボとは何ですか？ ファブラボに入りたいのですが？ また、ファブラボを作りたいのですが、どうすればよいのでしょうか？ など、最近、著者にはファブラボに関するさまざまな問い合わせが届く。FabLab Japan Networkのサイトによると、ファブラボはデジタルからアナログまでの多様な工作機械を備えた実験的な市民工房のネットワークであり、個人による自由なものづくりの可能性を挙げ、

「自分たちの使うものを使う人自身が作る文化を醸成することを目指している」とある。すなわち、個人で自身のものを作るDo it yourself (D.I.Y.) の精神をDo it with others (D.I.W.O.) として、自由に転送できるデジタルデータを有効に活用したものづくりを目指そうとするものである。もちろん、ここではデジタルデータのみで何でもできるというわけではなく、材料加工の段階では欠かせない、やすりがけなどの地味な手作業によるものづくりも踏まえている。

一方で、ファブラボは単に施設の名称だけでなく、共通の思想に基づいたプロジェクトの名称としても用いられるため、「ファブラボ」という名称は、デジタル・ファブリケーション機器を備えた工房全般を漠然と指す一般名詞ではなく、次の条件を満たした場合にのみ用いることができる固有名詞である、と国際メンバー間で合意されている。すなわち、1. 一般市民に開かれていること、2. ファブラボ憲章の理念に基づき運営されていること、3. 共通の標準機材を備えていること、4. 国際規模のネットワークに参加すること、などがあげられている。

ここで、ファブラボ憲章には、ファブラボの利用者は、人や機械を傷つけないという「安全」、掃除やメンテナンス、ラボの改善など、運営に協力する「作業」、ドキュメンテーション（文書化）とインストラクションに関する「知識」などの事項がまとめられている。

2.2 ファブラボの標準機材

ファブラボに設置される標準機材については、板材を彫刻やカットするレーザーカッター、3Dデータに基づいた形状に材料を積層しながら成形する3Dプリンタ、紙やカッティングシートなどを切り出すペーパー／ビニールカッター、木材や樹脂、金属などを切削するミリングマシン、木の板材を切り出して家具などを作る大型のCNCルーターなどがあげられている。近年はとくにファブラボ＝3Dプリンタという捉え方をされる向きもあるが、実際にはまだ現時点では出力に時間のかかる3Dプリンタよりも、レーザーカッターなどの方が稼働率が高いことが多い。また、3Dプリンタに関しては、活用するというよりも、むしろオープンソースで作られたRepRap (Replicating Rapid prototyperの略) のように、自己複製できる3Dプリンタを作る取り組みが多く見受けられる。著者もこれに興味をもち、ファブラボにおいて図1に示すような3Dプリンタを自作した³⁾。

2.3 ファブラボの商標権

ファブラボの名称について利用許可を出すような

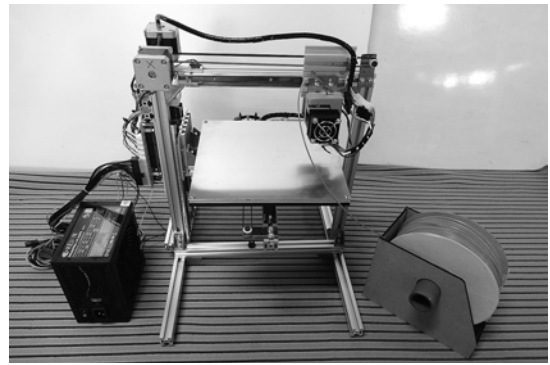


図1 著者が自作した3Dプリンタ

確証システムは現時点ではないため、全世界に増え続けているファブラボの数を正確に把握することは難しい。近年、世界ファブラボ代表者会議に参加するメンバーらが、世界のファブラボ関連施設を登録式でまとめたサイトを立ち上げており、とても参考になる⁴⁾。2014年7月時点では、こちらに61カ国、354ヶ所のファブラボが登録されている。

近年、ファブラボのネットワークに属さなくても、ファブラボに類する名称を付けて工作機械の時間貸しなどをする施設が増えている。そのような施設がファブラボと名乗ることはどう捉えるのか、また、もしある企業が「ファブラボ」という商標権を取得し独占したら、それ以降は「ファブラボ」と名乗って新たに活動を立ち上げることができなくなってしまうというリスクがある。そのため、FabLab Japan Networkでは、弁護士などによる有志グループFab Commonsが提案するオープン・トレードマーク・ライセンス (OTL) というライセンス形式を用いて「ファブラボ」という商標を守りつつ、条件付きで一部開放することにした。この意図は、ルールに基づいた「ファブラボ」という固有名詞の健全な使用を維持することであって、独占することではない。

3. 世界ファブラボ代表者会議

毎年一回、ファブラボの運営に関わるメンバーたちが一週間集うサマーキャンプが、世界ファブラボ代表者会議である。著者は、2012年にニュージーランドの首都ウェリントンで開催された第8回の会議であるFAB8にはじめて参加した。このときは世界中から百数十名ほどの参加者があり、その地域の多様性に驚いた。一週間の日程では、一般の学会のような講演発表に加えて、各地のファブラボの紹介をして交流を深めたり、実際にデジタル工作機械を活用するさまざまなワークショップやファブラボの運営方法についてのセッションなどが盛り込まれている。また、自由にものづくりができる場も用意されており、期間中に国別対抗のものづくりコンテ

ストが開催されたこともある。

2013年のFAB9は著者の出身地である横浜で開催され、その運営などに関わるとともに、この期間に横浜関内にオープンしたファブラボ関内のディレクターにボランティアで関わることになった。ファブラボの運営母体を見ると、世界的には大学や公民館、博物館など公的な期間であることが多い。一方、日本の場合には個人が私営で立ち上げたファブラボが多く、公的な機関が支援しているものもある。

ファブラボ関内は、NPO法人の横浜コミュニティデザイン・ラボの傘下で、週末のみのオープンという形で立ち上げ、何とか1年間運営することができた。年齢は20代～70代まで、さまざまな経歴の方が集まり、日々、ものづくり活動に取り組んでいる。当初はレーザーカッターや3Dプリンタの基本操作を覚えて、自分だけのものを作るという取り組みが多かったが、最近はロボットや家具などを共同で作ろうというプロジェクトがいくつか動き出している。

2014年7月にはスペインのバルセロナで開催されたFAB10⁵⁾に全日程参加した。はじめてのヨーロッパで一週間過ごすのは不安が多かったが、すでに昨年までで顔なじみになった仲間も増えて、楽しく過ごすことができた。最近の私の関心事は3Dプリンタの自作である。すでに昨年のFAB9において、樹脂を溶かして積層していくRepRapベースの3Dプリンタを組み立てており、ファブラボ関内でもプロジェクトとして動きは始めている。また、高校の生徒たちが3年次の科目「課題研究」において、グループで取り組む研究では、食べ物を出力する3Dフードプリンタの開発に取り組んでいる。FAB10の会場ではRepRapBCNをはじめ、自作の3Dプリンタが数多く出展され、とても参考になった。その中でも、シリンジにチョコレートを入れ、これを積層していくフードプリンタのワークショップ(図2)では、各国からの参加者ととともに標準の3Dプリンタ



図2 FAB10での3Dフードプリンタのワークショップ

をハックしてチョコレートを積層することができ、とても有意義であった。3Dフードプリンタではシリンジ内にある粘性のある流体を一定量押し出しながら積層するときに、かなりの力が必要になるため、空気圧を駆動源としているものも見受けられた。食品機械に空気圧を使用することは、衛生面からも優れた取り組みであるため、今後フルードパワーの研究としての取り組みも増えていくことが期待される。

4. おわりに

どの地域のファブラボも標準機材は同様であるため、その規模は異なるものの、作りだすことができるものは同様であることが多い。しかし、そこで生み出されるものには地域性が大きく関わっている。

すなわち、ファブラボが設置された目的は、失業対策や貧困撲滅から、創業支援、イノベーション推進などまで幅広い。また、STEM教育(academic disciplines of science, technology, engineering, and mathematics)と呼ばれる教育法と密接に関係した取り組みも多く見受けられる。

翻って、日本のファブラボでは、自分自身のものを作るという意味合いが比較的強かったが、すでに先行して市内に複数のファブラボが設置されているバルセロナやベルーなどに学びつつ、ファブラボの基本サイクルである、学び(Learn)、作り(Make)、分かち合う(Share)の中から、グループでプロジェクトに取り組む事例も増えている。また、自分で必要なものを自分でつくるのに必要な技術を身に付けた人々が地域に貢献してファブ社会⁶⁾を作っていくという提案もなされている。

専門家だけでなく、一般市民がものづくりを通して自分自身および社会を豊かにしていく活動ができる拠点としてのファブラボの活動に、著者自身も関わりながら、その活動がますます増えて活発になることを見守っていきたい。

参考文献

- 1) ニール・ガーシェンフェルド：ものづくり革命 パーソナルファブリケーションの夜明け、ソフトバンククリエイティブ、(2006)
- 2) ニール・ガーシェンフェルド：Fab-パーソナルコンピュータからパーソナルファブリケーションへ、オライリージャパン、(2012)
- 3) 門田和雄：3Dプリンタではじめるデジタルものづくり、日刊工業新聞社、(2013)
- 4) <https://www.fablabs.io/labs>
- 5) <https://www.fab10.org/en/home>
- 6) 総務省「ファブ社会」の展望に関する検討会報告書、座長 田中浩也、(2014.6)

(原稿受付：2014年7月28日)

解説

3Dプリンティングを活用した実習系授業の取り組み

著者紹介

まつもとひろき
松本大樹室蘭工業大学大学院
〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1
E-mail: h_matsu@mmm.muroran-it.ac.jp

2000年室蘭工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了。日本学術振興会特別研究員PDを経て2004年同大学工学部講師。現在に至る。振動工学、音響工学の研究に従事。日本機械学会、日本音響学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

近年3Dプリンタが脚光を浴び、個人にも手の届く価格の製品も開発されている。これらの技術は、さまざまなものづくりのアイデアを容易に実体化する手法として活用されている。3Dプリンティングの手法は積層造形法のほか、切削造形法も知られている¹⁾。積層造形法を利用する機材は3Dプリンタ、切削造形法を利用する機材は3Dプロッタと呼ばれており、本学ではPBL（Project Based Learning）の実習科目において両者を利用している。本解説では、その活用事例を紹介する。

2. 講義内容

2.1 講義目的

室蘭工業大学機械航空創造系学科（以下、本学科）の機械コースとロボティクスコースでは、4年生の前期の演習科目として、機械科学設計法とロボティクス設計法を開講している。これらの科目では、学生が中心となり、グループワークによって目的の機器を創造し、設計して、製作するといった一連のものづくりを経験し、その成果をプレゼンテーションやコンテストによって発表する。講義の目的は、機械工学を中心とした学修の成果の総合、コミュニケーション能力の向上、プレゼンテーション能力の養成である。3Dプリンティング技術は、各グループで設計した部品の製作手法の一つとして導入している。

2.2 機械科学設計法

機械科学設計法では、図1に示すような、プロペラバギー車の設計と製作を行っている。学生に与えられる課題は、「プロペラを動力源としたバギー車

を設計製作し、直線凹凸路を走破する時間を競う」というもので、学生は動力源となるプロペラと、悪路走破性のある車体を設計、製作する。共通に与えられるのはモーター、電池ボックスとばねであり、その他の部品は製作する。各部品の製作には、3Dプロッタ、レーザ彫刻器を主に利用している。これらの加工方法により、CAD上のモデルがほぼそのままに実車で再現できる。3Dプロッタは、プロペラ切削、サスペンション部品、モーターサポート類の切削に用いられる。

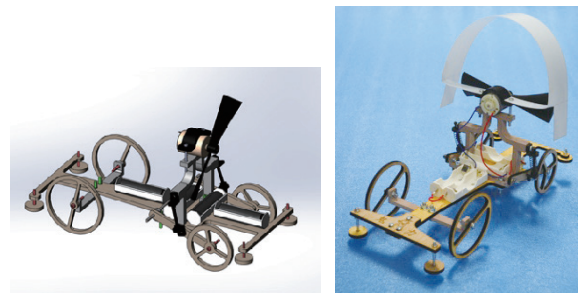


図1 風力バギー車の例（左：3D CADモデル、右：実車）

2.3 ロボティクス設計法

ロボティクス設計法は、ロボット・トライアスロン²⁾標準ロボットを教材として、メカトロニクス・システムの設計法や製法などを具体的に学習する科目となっている。ロボットの機能は、ラインレースの他、コーンを持ち上げ、スタックするための機構部分も持っていて、コースに設けられた課題をこなし、ゴールを目指すものである³⁾。機体の製作には3Dプリンタ、3Dプロッタも用いられる。機体ベースには3Dプロッタ、その他機構部品の一部に3Dプリンタが用いられている。

2.4 3Dプロッタの利用例（機械科学設計法）

3Dプロッタ（切削造形法）の利用例を紹介する。

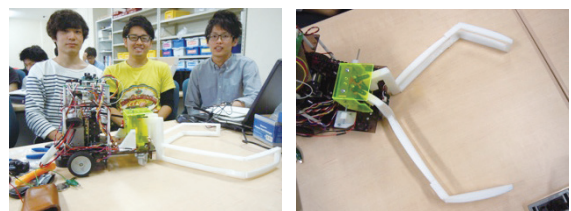


図2 ロボティクス設計法での製作例

プロペラバギー車の課題では、部品強度および精度の問題から3Dプロッタを採用した。図3にABS樹脂の加工中の写真を示す。エンドミルはステッピングモータにより位置制御され、被削材は回転支持ユニットにより表裏の加工が可能である。また、付属ソフトウェアによる分解能は0.01mm/stepである。

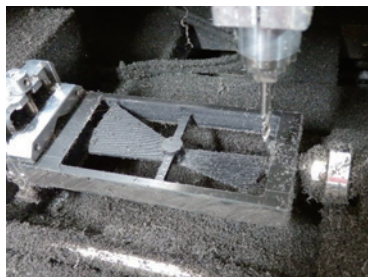


図3 切削造形法によるプロペラ製作

プロペラ製作の作業工程は、(1)プロペラ設計の基本理論と自作プログラムでプロペラ推力を計算し、プロペラ形状を決定する。(2)3D CADにより3Dモデル(図4左)を作製する。(3)3Dプロッタで削りだすための支持部を追加した切削モデル(図4右)を作製する。(4)3Dプロッタ付属ソフトウェアによりツールパスを作製、編集する。(5)3Dプロッタで切削し(図5)、支持部分から切り離して完成。となっている。なお、切削行程は荒削り、仕上げの二段階になっている。速度と精度を確保する仕組みになっている。図5を見るとわかるように、表面も非常に滑らかに仕上げるができる。一方、サスペンションの部品の製作行程もほぼ同様で、機構の設計の後3D CAD上で動作確認をして構造を決定し、以下、同様の行程を踏む。図6のように、サスペンション部品は複数の部品をアセンブリして一度に削る工夫をしている。

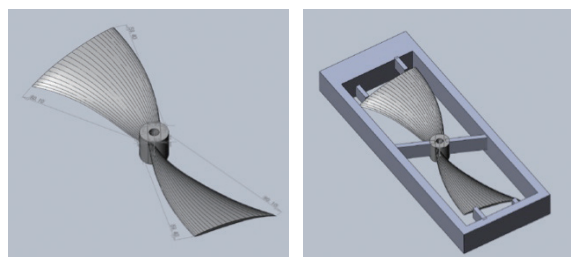


図4 プロペラの3D CADモデル(左)と切削モデル(右)



図5 プロペラの切削例

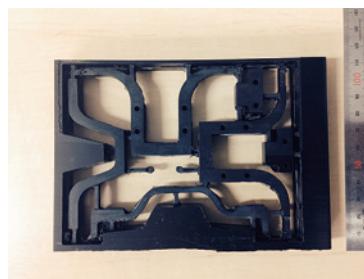


図6 サスペンション部品の切削例

切削時間は、数時間から十数時間かかる。このため、講義時間外の作業が必要であるが、加工開始後、完成まで付きっきりというわけではなく、付属ソフトウェアで計算される完成予定時刻までは、機械任せでも大きな問題は生じていない。ただし、加工工程によっては、途中でエンドミルを交換する場合もあり、その際には手動で交換が必要となる。

講義では、学生に対してあらかじめ素材と加工方法について情報を与えているが、3Dプロッタに関する予備知識はほとんどなく、利用経験もない状態で開始される。学生には、マニュアルを渡すとともに、加工開始前に一度だけ使い方を説明し、切削加工の勉強も兼ねて、本人の手で加工を行うようにした。使い始めから、およそ1ヶ月程度で部品の加工はすべて終わり、いくつかの部品は複数回作製するなどの試行錯誤も可能であったことから、利用に対する敷居は低いと考えられる。しかしながら、3Dプロッタは物理的な切削加工を行うため、被削体が溶ける、加工時に押し付け力で被削体の変形して精度が落ちるなどのトラブルもあり、それなりの試行錯誤や細かな設定が必要となり、難しさがあることがわかった。3Dプロッタは2台で8グループの加工を担っている。学生アンケートでは3Dプロッタの数を増やしてほしいという回答が散見され、苦慮している部分である。一部品あたりの加工時間が短縮されれば、待ち時間が少なくなり、より利用しやすくなると思われる。

2.5 3Dプリンタの利用例(ロボティクス設計法)

3Dプリンタ(積層造形法)の利用例として、ロボティクス設計法での部品製作の例を紹介する。3Dプリンタは、3Dプロッタと比較すると製作行程は非常に簡単で、3D CADでのモデル製作が終われば、専用のアプリケーションでいくつかの設定をするだけで、数十分から数時間で製造が終了する。このため、ティーチングアシスタントが製作を担当してもそれほど負担にはならないようである。本学科で利用している機材はABSを積層材料として利用するもので、積層方向の解像度は0.125, 0.25, 0.5mmの3段階から選択することができる。図7に加工中の様子を示す。製造部品のサポートのためにPLA樹脂(黒色)の層を積層し、その後でABS樹脂(白色)を積層していく。図8に仕上がり例を示す。図8に示すように、六角形の穴も製作することができ、こ



図7 積層造形法による部品製作

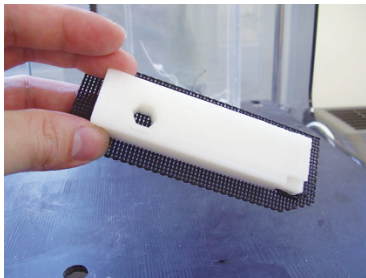


図8 部品製作例



図9 積層造形法による部品製作

れまでの機械工作では採用し得ない形状や、機械加工ができない形状も簡単に製作することが可能である。この長所は、もの作りにおける“デザインードリブ—マニファクチャリング”へのパラダイムシフト⁴⁾と言われる部分でもあり、今後も積極的に講義内で紹介するべきであると考えている。図中のPLA樹脂部分（黒色部分）は容易に取り外すことができるが、接触面の仕上がりは、上面に比べて滑らかではない。また、この機種ではベース部分の温度調整機能がないために、積層した樹脂が冷える際に収縮する問題があり、図9に示すような変形が起こり、完成後に再加工が必要になる場合もある。写真では、ベースに接する面側が収縮し、やや反った形状になってしまっている。しかしながら、このような欠点を考慮した上で、図2のアーム（白色部分）のように機体を完成させることができている。

3. ま と め

本学科では、3Dプリンティング技術を実習系講義に取り入れ、部品の加工に用いた。この加工技術によって学生のアイデアを容易に実体化すること

ができることを紹介した。

3Dプリンティングの手法は、切削造形法と積層造形法の2種類を採用したが、いずれも長所と短所があった。切削造形法は、NC機器などを知っている機械系学生にとっては比較的親しみやすい造形方法である一方、加工時の設定にそれなりの難しさがあった。また、切削加工のための制約もあるが、従来からの機械加工の延長線上での学修には良い経験となると思われる。完成した部品は強度、精度ともに満足のいくものであった。

積層造形法では、製作時の設定は非常に簡便で、加工時間も短く、製造に対する敷居は非常に低い。さらに、機械加工できない形状をも実体化することが可能であり、今後新たなものづくりの手法としての可能性を感じることができる。しかしながら、現状の機器では、製造された部品の精度、強度、表面性状はやや劣り、機構部分で強度の必要な部分には利用しにくい場合もあった。これらの問題は機材の価格帯による性能改善により解決される部分もあると思われるが、大学の講義の中で利用できる予算には限りがあり、すぐさま改善することは難しいのが現状である。しかし、精度などの欠点も、発想の自由さを許容する長所に対しては小さなことだと思われるので、設計技術の革新という長所を認識させる形で学生に利用法を考えてもらうことが重要と思われる。

これらの授業により3D CADの利用技術は向上する。そのCAD上のモデルと実物との間には加工精度の問題で、ある程度のギャップが存在する。機械は決まった精度でしか加工できないことを実体験できることも、設計した部品を実体化できる大きなメリットと考える。

3Dプリンティングの利用に対する学生の反応は良く、ものづくりの楽しさを感じさせるには良い技術である。授業の目的に応じて加工方法を選択することで、数ある3Dプリンティング技術を効果的に利用できると考える。

さいごに、資料などをご提供いただいた本学助教、成田幸仁先生に御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 京極秀樹：最近のレーザ積層造形技術の開発動向，近畿大学次世代基盤技術研究所報告，Vol. 1, p. 69-76 (2010)
- 2) <http://www.robot-triathlon.org/top.html>
- 3) http://www.robot-triathlon.org/2013/course_2013C.pdf
- 4) 酒井仁史：新たな製造法“アディティブマニファクチャリング (AM)” その使い所と勘所，素形材，Vol. 54, No. 2, p. 47-53 (2013)

(原稿受付：2014年7月29日)

解説

中小企業における3Dプリンタ活用の可能性

著者紹介



ふくおか しんごろう
福岡 新五郎

ウナック研究所
〒165-0032 東京都中野区鷺宮3-14-6
E-mail: lunagq@ybb.ne.jp

1971年東京大学大学院工学研究科博士課程修了、生産技術研究所助手を経て、1975年古河電気工業㈱主任研究員、2002年主席研究員で定年退職、以降ウナック研究所代表、塑性加工・生産技術の開発に従事、産学官連携コーディネーター、日本塑性加工学会フェロー、博士（工学）。

1. はじめに

3Dプリンタ（以下3DP）はさまざまに取り上げられ、ブームともいえる状況である今、さら付け加えることもなさそうであるが、実際のもの作りの現場でどのような可能性があるのか、特にその限界について、冷静に概観することとしたい。やや決めつけた言い方をすれば、つぎのようにまとめられる。

①小まわりの効く特徴を生かせば、かなり頼りになる戦力となる。②並級、試作（模型）、プラスチック製、が得意のエリア。③熟知すれば高品質も期待できるが、逆に技術を過信すると裏切られる。④金属、セラミックも可能であるが、焼結、粉末冶金技術や材料の知識が十分でないと、良い結果は得られない。⑤基本的に量産には向かない。

2. ラピッドプロトタイピングから3DPへ

2.1 アメリカからブームが来た

このブームはアメリカから渡来した。元々3DPは日本の発明で、ラピッドプロトタイピング（以下RP）と呼ばれていたが、2012年10月に3DPによるものづくり革命を宣言した、「Makers: The New Industrial Revolution」が世に現れ、続いて2013年2月オバマ大統領の一般教書演説で取上げられて大きな動きとなった。前年国防総省を中心に、約30億円を投じて設立したNAMII（National Additive Manufacturing Innovation Institute: 付加加工開発研究所）を拠点として、3DPにより製造業を米国内

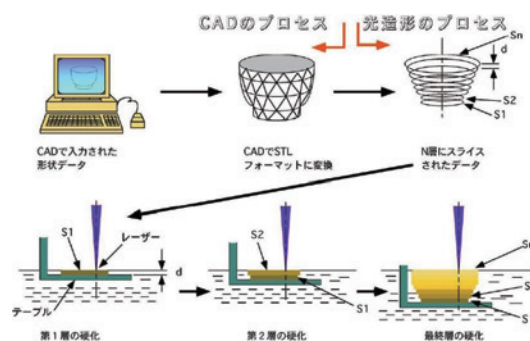


図1 光造形RPのプロセス¹⁾

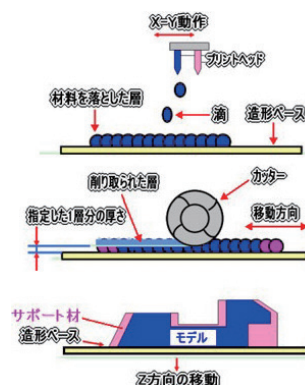


図2 FDM法3Dプリンタの造形プロセス²⁾

に呼び戻すことを狙ったものである。

2.2 RPと比べて3DPは何が新しい?

RPは1980年小玉秀男（名工試）の光硬化性樹脂を紫外線で硬化させる、光造形技術の世界的発明に端を発しているが、実機は1987年システムズ、1988年三菱商事が相次いで上市した。光造形のプロセスを図1に示す。その後日本ではシーメット社が開発を進め、ベンチャー企業インクスは華々しく試作事業に取入れたが、リーマンショックもあり、予想ほど大きな成長がなかった。「3Dプリンタ」は、図2のFDM（fused deposition modeling）・熱溶融積層造形法のプロセスイメージが強いが、今はほぼすべての積層造形（付加加工）法を指し、日本のRPがアメリカの3DPに乗っ取られた形である。

プロセスは前段の設計・CADデータ作製と、後段の実際の積層造形に分かれ、両プロセスとも前段は

同じである。光造形では液体樹脂中に積層、沈めていくのに対し、FDMは積み重ねていく。

装置は光造形がFDMより通常大型で高価である。

他に金属・セラミック用焼結タイプなどがあり、世の中のブームは廉価のFDMであるが、オバマのNAMIIはもっと高度のプロセスを狙っている。

本稿では積層造形をすべて3DPと称することとする。

3. 小まわりの効く特徴を生かし、試作で戦力化

外観にこだわらなければ、ワンストップのプロセスであるから、簡単な試作は短時間に行えるので、重宝である。図3は大学の研究で使う実験装置の筐体であるが、最近のものづくり系の学部では、学生が3DCADを使えるので、この程度の試作は比較的容易にできる。上が設計図（SolidWorksによるモデリングデータ）で、下が製作品である。モデリングデータをstl形式で保存し、これをもとに3DP用データ設定（積層ピッチなど）を行い、装置を運転した。Makerbot（Stratasys）社製Replicator 2（デスクトップタイプ）によるもので、材料はPLA（ポリ乳酸240℃）、積層ピッチ0.2mmである。製作時間は約7時間であった。これをたとえば切削加工で製作するとなると、通常学生には手におえない。

この装置のスペックは、積層ピッチは0.1mmであるが、その場合は時間が倍掛かることになる。実験装置であるから、図3下程度の、縞状のざらつきが

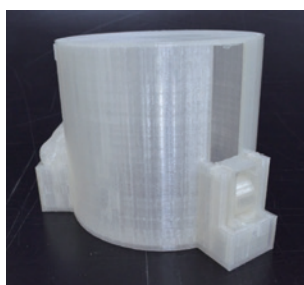
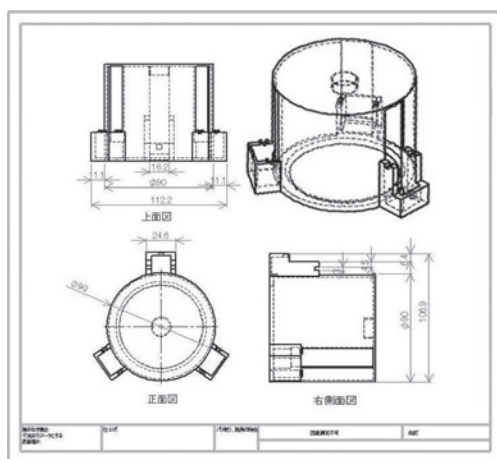


図3 実験装置用試作筐体

認められる外観品質は問題にならない。このような用途には大いに頼れる戦力である。

しかし商品とするには、通常0.1mmのざらつきは許容されないので、磨きなどが必要となる。材質の選択や設計により、一定の外観品質の改善は可能であろうが、技巧を要することとなる。高級品を大量に作ることは難しい。

4. 熟知すれば高品質も。しかし過信は禁物

4.1 心臓外科医も熟知したい細部、冠動脈



図4 (株)JMC渡邊CEOと冠動脈付き心臓モデル^{3),4)}

図4は首相との懇談会に招待されるなど、経営者としても評判の、(株)JMC渡邊CEOとその製品の心臓モデルである。元ボクサーであるというジャブと頭の回転の速さで、一見軽い青年実業家にも見えるが、草創期に近い時期の光造形から事業をスタートしているので、この技術については熟知しており、不動のものを感じさせる。何より職人的技能の売込みからでなく、顧客ニーズに対応して事業を構築して来たところが強みである。心臓モデルなどは心臓外科医の協力・ニーズに接することができなければ、スペックすら決められない。もちろん、医師の要求に応えるためには、素材知識を始め技術の熟知が不可欠である。

臓器モデルについては、国が医療機器産業育成を成長戦略の一つの柱としていることもあり、事業として期待される。なお本分野では、国立科学博物館の「医は仁術」（2014年春）展で、内部の血管もマルチカラーで再現した、立体カラー透明臓器を展示した(株)ファソテックが注目を集めた。

実際、肺の生体移植手術の術前検討に現実的に役立てたというニュースも耳新しい。

JMCはまだ中小企業の規模であるが、鋳造分野にも3DP技術を展開している。ただし、鋳造については次項で触れることにする。

4.2 知られていない鋳物がエネルギー問題のキー

今の学生は、3DCADはかなり良く知っているが、鋳物は奈良の大仏のように過去のものと思っている。実はガスタービン翼や自動車のエンジンブロックなど、燃費即ちエネルギー問題に関して重要な部品が

鋳物で作られている。その鋳造の問題点の一つが木型（模型）である。木型なしでの鋳型製作が試みられており、特に3DPによる中子製作技術開発が平成23年度「戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン）」で取組まれた。「ラピッドプロトタイピングによる精密鋳造用鋳型および中子の迅速造型技術の開発」において、粉末焼結積層造形（SLS：Selective Laser Sintering）技術により、精密鋳造用中子の製造技術を確認し、次いで精密鋳造鋳型と中子を一体で造型する技術の確立を狙った。

SLSは図5に示すように、レーザーで粉末を焼結してはテーブルを下げて粉末を供給することを繰り返す積層造形プロセスで、本研究では有機バインダー付きのセラミック粉を使用し、成形後二次焼結を行って、完成する。

目標とする製品はガスタービン動翼で、内部に乱流冷却のための流れを乱す流路構造となっており、中子は非常にデリケートな形状である。

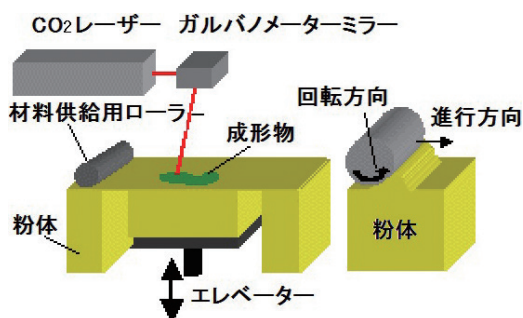


図5 粉末焼結積層造形法（SLS）⁵⁾

図6にSLS造形後、二次焼結した250mmブレード用中子、図7に中子と鋳型を同様の工程で製作した一体鋳型によるブレード鋳物製品を示す。



図6 SLS後二次焼結した中子⁶⁾

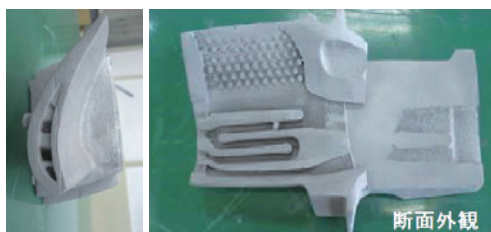


図7 SLS・二次焼結一体鋳型による鋳物⁶⁾

実際のタービンプレード材料はインコネルなどの超合金で、真空溶解など、特殊な工程を要し、付加価値が高いので、本開発成果は3DPの適用例として期待を高めた。

ただし、実用化には、特にセラミック粉末および焼結条件の最適化など、課題は残されている。

本研究はアスペクト社（国産）の3DP装置で行われたが、ドイツ製EOSINT（NTTデータ社）はSLSで実績がある。

5. 金属、セラミックも可だが、要求品質は？

前節で述べたとおり、3DPで金属、セラミックを造形することは可能である。しかし、粉体を用いるので、表面のざらつきは避けられない。特に金型に適用したい場合は、要求品質を満たすため機械加工仕上げを要し、省工程の有難味が薄れる。

そこで、これも国のプロジェクトで取組まれたテーマであるが、数回の焼結積層後に端面の切削加工で輪郭を滑らかにし、表面粗さを金型レベルに改善する、複合加工法が開発された（図8）。

このプロジェクトのメンバーであったパナソニックは、開発された複合加工3DPの戦力化に取り組んでおり、複雑形状でモデルチェンジの頻繁なヘアドライヤーなどの金型製作への適用を図っている。年に約5,000個の金型の半数を3DP製作とし、製作時間半減とコスト30%削減を目指している。

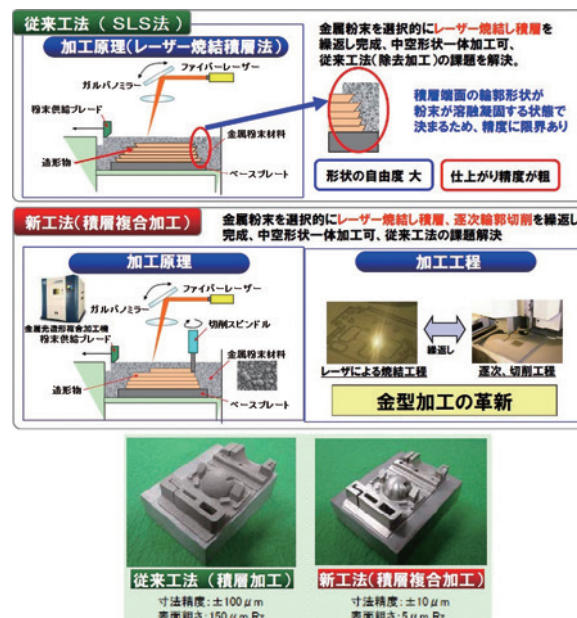


図8 金属光造形複合加工^{7), 8)}

6. 高度なプロセスで、世界をリードする技術へ

2013年に顕在化した、3DPのブームとアメリカの（オバマ教書の）3DPへの本格的取組みを前にし

て、日本も国主導の大きなプロジェクトが2014年から動き始めている。これはサポインのように直接中小企業を対象としたものではないが、成果は中小企業が実用することになるように思える。

約40億円の予算で、期間は5年である。

「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム（次世代型産業用3DP技術開発および超精密三次元造形システム技術開発）」と長いが、実施企業はほぼオールスターキャストで、素形材センター、産総研、近畿大学、東北大学、IHI、川崎重工、金属技研、木村鋳造所、群栄化学工業、コイワイ、コマツキャストックス、コマツ、山陽特殊製鋼、シーメット、住友精密、大同特殊鋼、多田電機、東芝、東芝機械、ナカシマメディカル、日産自動車、日本電子、パナソニック、パナソニックエコシステムズ、福田金属箔粉工業、古河電工、本田技術研究所、松浦機械製作所、三菱重工、矢崎総業、矢崎部品が参加している（図9）。

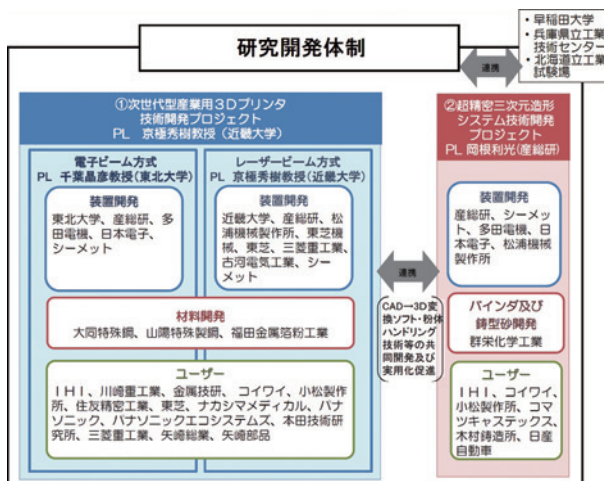


図9 三次元造形技術革命プログラムの研究体制⁹⁾

事業目的は、グローバル市場にける発展的な競争力の維持のために行う、三次元積層造形技術や金属等粉体関連の技術開発、鋳造技術の開発などである。

実用化の方向性としては、我が国産業競争力強化に繋げるため、標準化や市場動向調査等を踏まえて実用化を図る。

開発スケジュールはつぎのとおりである。

①次世代型産業用3DP：2015年度までに一次試作機を開発、2018年度までに世界最高水準の造形速度、造形精度の装置を完成、2019年度末までに装置の販売を開始する。

②超精密三次元造形システム：2015年度にプロトタイプ機を実用化、2016年度後期からは積層造形速度5万cc/hの砂型積層造形装置の販売を開始

する。最終形となる積層造形速度10万cc/h（現状の100倍）の装置は2018年度より販売を開始する。

具体的な開発装置等のイメージは図10のとおりであるが、重点は金属光造形技術開発、特に鋳造分野への適応が詳しく示されている。

②の鋳造分野への適用は上述の研究以外に、実際かなり進んでおり、本プロジェクトに属するコイワイはWEBでその事業を公開している。ほかに石膏鋳造も3DPは活用される段階に来ている。

一方①はこれまでにない技術の開発を目指しているようであって、特殊な金属材料（たとえばTiやインコネルのような、切削加工の難しい材料）の精密造形などが目標である可能性がある。エネルギー、航空・宇宙や医療分野での期待が大きい。

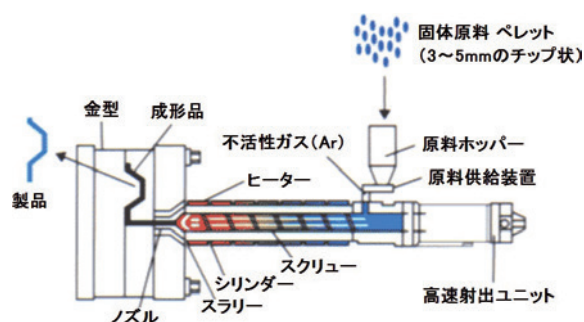


図10 開発装置および製品・技術のイメージ¹⁰⁾

7. 期待できる中小企業、悲劇的でないリスク

新しい加工法が現れると、もの作りに携わる中小企業は大いに影響を受けることがある。1997年にソニーが発売して大人気となったバイオノートはノートパソコンとして初めてマグネシウム筐体を採用したが、その加工には1992年に日本製鋼が実用化したチクソモールド法が用いられた（図11）。

チクソは良くわからないが、モールドならプラスチックの射出成形と変わらないだろう、という安直な連想と、この際バスに乗り遅れたらプラスチックの射出成形事業がギリ貧になって将来がなくなる、との思惑で多くのプラスチック成型事業者がこの装置を導入した。国内で100台は優に超えたとみられ

図11 チクソモールド法¹¹⁾

るが、現在有効活用している企業はきわめて少数である。本来マグネシウムは生産性の高いホットチャンバー方式のダイキャストが強力な技術を蓄えていたので、コスト競争で、チクソモールド方式はほとんどまともな市場を獲得することができなかった。

何より、マグネシウムはプラスチックと材料の熱特性がまったく異なり、チクソ（半凝固）どころか、固まらないように型に鋳込むことが難しかったので、プラスチックの経験しかなかった、射出成形業の事業者には気の毒な結果となった。

ただ、使いこなすことにより、付加価値の高い試作製品への適用で成功している例もある¹²⁾。

3DPはプラスチックを使う限り、チクソモールドのように、悲惨なことにはならないであろう。しかし、型を使わないので、サポート部の設計によっては、思いどおりの形状が得られない危険もあり、また、金属については強度を期待して、粉末を焼結するので、粉末成形の知識を必要とするほか、粉末が予期せぬ部分に溶着して、予期せぬバリとなるなど、固有の問題はあり得る。

CAD、CAMを使い慣れていれば、3DPでの加工は大きな問題はないであろう。いかに付加価値を高め、短納期を達成するか、がポイントとなる。

なお、国が上記のごとく力を入れている状況でもあり、人気も高いので、試作を行う事業者も多い。上記JMC以外にもWEBで当たれば当該のサイトが見つけられよう。東京では東京都立産業技術研究センター¹³⁾は最新の装置から、手軽なものまで相当の種類・台数を有しており、デザイナーが常駐してい

るので、デザインの相談から始めて、成形委託または自分で操作して成形するなどのサービスに広く対応している。各県の公設工業試験施設でも同様のサービスを行っている場合が多い。

まずは、かかる施設で3DP造形の実際に触れてみるのが良策と思われる。

参考文献

- 1) 萩原恒夫：ラピッドプロトタイピングの最新動向（2002初春），講演会資料，<http://www.thagiwara.jp/rp/RP2002-Jan/RP2002-Jan.html>
- 2) 3D造形サービスFORME（フォルム）：3Dプリンターによる3次元造形サービス，http://www.thinkcoltd.jp/zokei_service/3dprinter.html
- 3) 株JMC会社概要：<http://www.jmc-rp.co.jp/company/>
- 4) 株JMCメディカル：心臓，<http://www.medical-jmc.com/lineup/hear.html>
- 5) 早野誠治（株アспект）：Selective Laser Sintering，<http://www.aspect-rp.co.jp/sls1.htm>
- 6) 社日本鑄造協会：「ラピッドプロトタイピングによる精密鑄造用鋳型及び中子の迅速造型技術の開発」，p. 34-43（2012），<http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/portal/seika/2009/21163410001.pdf>
- 7) 株松浦機械製作所：金属光造形複合加工とは？，<http://www.matsuura.co.jp/japan/contents/products/new-lumex03.html>
- 8) 田中昌行：パナソニック生産技術の革新モノづくりへの展開，経済産業省研究会資料，http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seisan/new_mono/pdf/003_02_00.pdf，p. 12-16（2013）
- 9) 次世代3D積層造形技術総合開発機構の概要：経済産業省研究会資料，http://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/140124saishin/56.pdf，p. 1-2（2014）
- 10) 岡根利光：鑄造における3Dプリンタの活用，産総研講演会資料，<https://unit.aist.go.jp/amri/ja/openlab/2013/3d-1.pdf>，p. 4-16（2013）
- 11) 自動車情報プラットフォーム：チクソモールドリングのプロセス，http://www.marklines.com/ja/report/solrep139_200806，p. 1-4（2008）
- 12) 株菊池製作所：マグネシウム成形（チクソモールドリング）<http://www.kikuchiseisakusho.co.jp/business/details02.html>
- 13) （地独）東京都立産業技術研究センター：試験・研究設備加工機・造形機 <http://www.iri-tokyo.jp/setsubi/m/joto-h23-d01.html>

（原稿受付：2014年8月13日）

解説

RP造型機によるシェル鑄型の超短納期製作について

著者紹介



たか はし けい じ
高橋 啓二

コマツキャストックス株式会社
〒935-8501 富山県氷見市下田子1-3
E-mail: keiji_takahashi@komatsu.co.jp

1991年京都大学工学部冶金学科卒業。同年小松製作所氷見工場に入社配属。1997年コマツキャストックス(株)分社独立し、現在鑄造技術部主幹として任務。建設機械の鑄造部品の鑄造技術改善・品質改善に従事。日本鑄造工学会および日本鑄造協会などの会員。

1. はじめに

建設機械の鑄造素材部品の製造において、エンジン部品や油圧部品の鑄造素材でも近年の排ガス規制対応でさらに複雑形状でかつ高い寸法精度の部品を短納期製作で要求されるケースが多くなっている。複雑形状でかつ比較的寸法精度の高い鑄造品の造型方法としてシェルモールドを採用している場合、そのシェルモールド鑄型を作るための金型を製作する期間が非常に長く、短納期の開発に支障を来すことがある。また、開発品の試作段階では、最適形状をつかむために形状変更が頻繁に必要となり、その分金型修正期間も非常に長い。

そこで、開発段階の鑄造部品の製作において3Dデータを用いてシェルモールド用の砂を直接レーザで焼成し鑄型を金型なしで製作するRP造型機を導入し活用することで従来の開発品の製作リードタイムの短縮が可能になった。本編ではその活用事例を紹介するとともに、今後の鑄造品の3D積層造形の有効利用について述べる。

2. RP造型機の造型プロセスと特徴

2.1 造型プロセスについて

2.1.1 造型フロー

粉末レーザ焼結型RPによる造型フローを図1に示す。光造形と同様にサポート設計、スライスデータ生成、造型の工程を経るが、その後後処理(サポートの除去)、オープンによるポストキュア(二次焼成)が必要である。

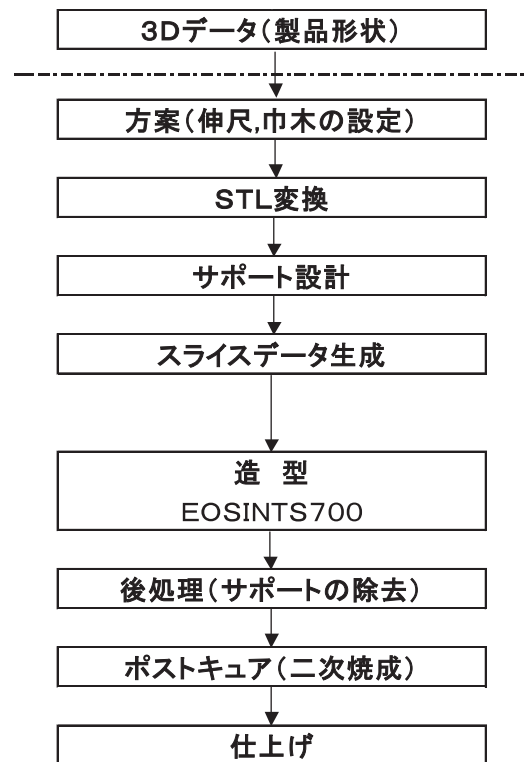


図1 造型フロー

2.1.2 装置概略

粉末レーザ焼結型RPによる造型は、砂を所定の厚さでテーブル上に一層敷き詰め、CADデータから作られる断面データ(スライスデータ)を基にして、レーザが高速走査し断面形状を塗りつぶしていく。

レーザが照射された部分のみが焼結し固められ、それ以外の部分は未硬化である。

一層走査し終わるとテーブルが一層の砂の厚さ分だけ下降し、リコータが新たに砂を敷き詰め、新たな断面データでレーザが走査する。

これを繰り返すことで複雑形状の鑄型および中子

表1 粉末レーザ焼結型RP装置の仕様

レーザタイプ	CO ₂ 、50W×2
走査スピード	Max3000mm/s
造型チャンバサイズ	720×380×375mm
積層ピッチ	0.2mm

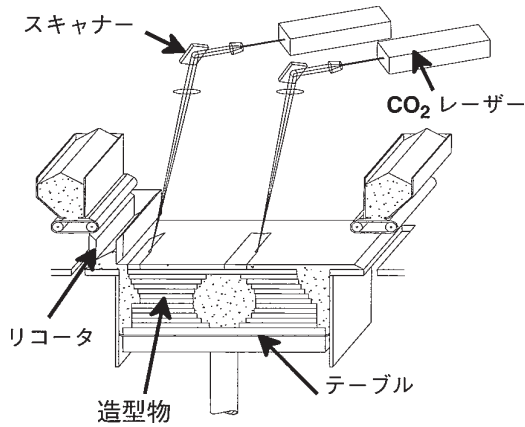


図2 装置概略

を造型できる。仕様を表1に、装置概略を図2に示す。

2.2 造型の特徴

2.2.1 サポート設計

2.2.1.1 ブリッジ形状の補強

造型中に小さな断面から大きな断面に急成長する場合、下の面との接合が悪く反り上がりやすい。

これを防ぐためのサポートが必要となる。

2.2.1.2 除去のしやすさ

造形物に対して硬すぎるサポートをつけると除去するのに時間がかかるばかりでなく面粗度が悪くなる。サポートと造形物との重なる層数、造形物に対するサポートのレーザー強度を適正に設定することが重要である。

2.2.1.3 造形物全体の補強

造形時リコータに対し造形物の安定性を確保する。

2.2.1.4 ポストキュア時の歪み対策

レーザーにて一次成形した後、オープンにて二次焼成し最終強度を得るが、この時形状によっては変形が起こる場合がある。特に肉厚変動の大きい形状の場合は不均一な収縮のためにヒビがはいったりする。これを防ぐために補強のサポートを残しポストキュア後に除去する場合がある（図3）。

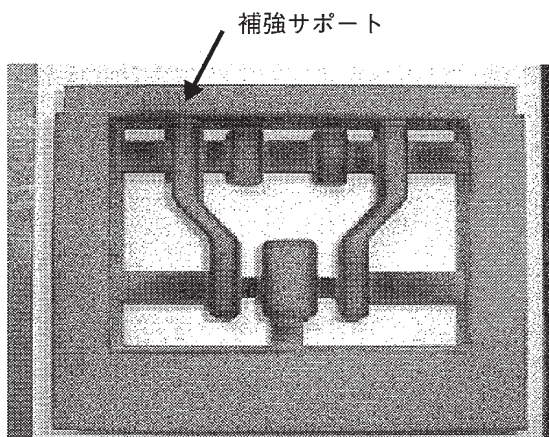


図3 補強サポートの例

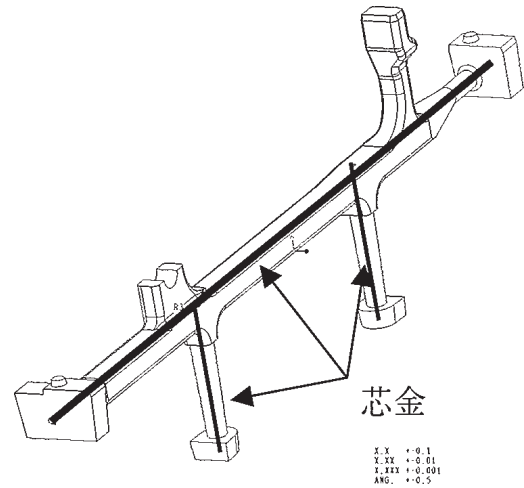


図4 細長い中子への芯金の挿入

2.2.2 芯金の使用

現行細い鋳抜きの場合、鋳造時の中子の折れ、または曲がり対策として芯金を入れる場合がある（図4）。

これは鋳物の品質を保証する上で必要不可欠な技術である。特に鋳鉄はアルミ鋳物に比べ中子は高温にさらされるため、このような配慮がなされる。積層造型という性質上異種の材料の挿入は困難であるが、種々の試行により二次元形状の芯金挿入の技術を確認した。

2.2.3 抜き勾配の省略

従来の主型から抜き取って鋳型を作成する方法に対して直接鋳型が作れるため抜き勾配を考慮する必要がなく、かつ鋳型の分割も簡素化できる。これは3次元CADデータの作成工数の大幅な低減が可能となる。理想は機能設計の早い段階で型設計までのノウハウを織込んだ形状を考慮するコンカレント設計であるが、まだそこまで至っていないのが一般的である。それは設計部門が機能上必要な形状を設計した後、製造部門で製造上必要な形状に3次元CADのデータを仕上げていく方法であるため、工数は非常に増大する。組立の確認のため、量産時の型分割を考慮した中子の分割は必要であるが、抜き勾配等の細部の型設計を省いたデータ作成で鋳物を作れることは開発リードタイムの短縮に大きく寄与する。

3. RP造型機での適応事例

非常に複雑で高い寸法精度の要求される油圧機器用鋳物を選定し、そのRP適用素材を製作し従来法による素材と比較した。中子の外形サイズは190×140×60mm、素材の外形サイズは135×139.5×48mmで、材質はFCV黒鉛鋳鉄、重量は4.2kgである。

中子製作に粉末レーザー焼結型RPを適用し、外型

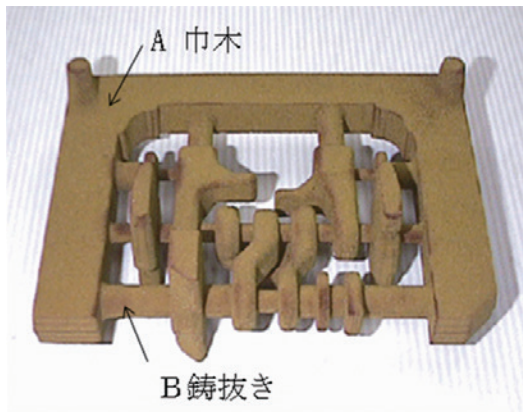


図5 油圧機器鑄物用RP中子

は木型を用い量産ラインにて製作した。

粉末レーザ焼結型RP装置によって造型した中子を図5に示す。

3.1 RP中子特性

3.1.1 RP中子砂強度

10×10×60mmの試験片を造型し抗折力試験を行い従来品と比較を行った。その試験結果は従来45～65kg/cm²に対して50kg/cm²以上を示しており、通常品の必要強度を満たしている。

3.1.2 中子の寸法精度

中子はほぼ狙い寸法で造型されており、A巾木上面の平面度は±0.2mm、B鑄抜きの反りは中央部で0.15mm以内である。

3.2 鑄物特性

破断寸法検査の結果は寸法精度としては従来法と同等である。さらに浸透探傷検査から内部欠陥は検出されず、健全なことが確認された。レジン量が多いためガス欠陥が懸念されるが、CADデータ上でガス抜き形状を付加することで十分に対策が可能である。またポストキュアで十分に焼成しているため、鑄造時の初期のガス発生量が比較的少なくなっていることも特徴である。

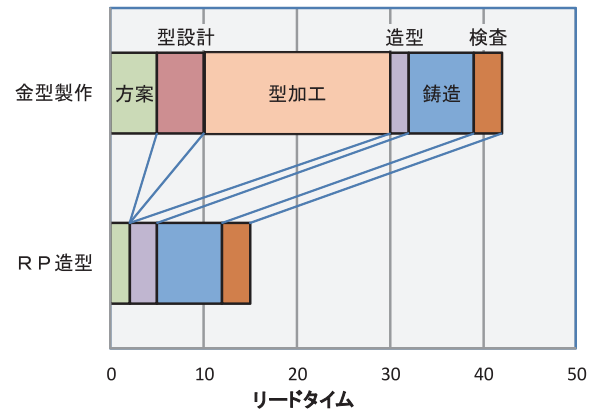


図6 トータルリードタイム

3.3 製作リードタイム

巾木付きの中子データおよび外型が支給されてから、中子製作（試行錯誤有り）、外型模型加工、鑄造、簡単な寸法検査までのトータルリードタイムは従来の金型を製作した場合に比べ約1/3である（図6）。

4. ま と め

以上から粉末レーザ焼結型RPは高い寸法精度の要求される鑄物の試作に対し品質的にも十分に適用できるレベルにある。また本事例は比較的小型であるが、中子もしくは鑄型のアセンブリ設計も可能であり、シリンダーヘッドなどの大型で複雑な鑄物の鑄造が可能である。その結果、試作は粉末レーザ焼結型RPにて鑄物を数水準製作して性能試験をし、形状を作り込んだ後に量産用金型を作るという動きが始まっている。設計の早い段階で試作ができ開発リードタイムの短縮とともに試作コスト低減を図れるシステムである。また、今後、造型速度が向上していくことで量産用としての活用も考えられる。

（原稿受付：2014年8月25日）

会議報告

ROBOMECH2014における フルードパワー技術研究動向

著者紹介



はや かわ やす ひろ
早川 恭弘

奈良工業高等専門学校
〒639-1080 奈良県大和郡山市矢田町22
E-mail : hayakawa@ctrl.nara-k.ac.jp

2006年奈良工業高等専門学校電子制御工学科教授、現在に至る。空気圧を用いた福祉介護機器開発の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、IEEEなどの会員。博士（工学）。

1. はじめに

ロボティクス・メカトロニクス講演会（以下、ROBOMECH）は、一般社団法人日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門が主催する講演会である。

ROBOMECH2014は、2014年5月25日（日）～29日（木）の日程で富山国際会議場と富山市総合体育館において開催された。講演会初日は、富山国際会議場において社会講座（特別講演会・製作教室）、ワークショップやチュートリアルが行われ、ポスター講演は2日目から4日目に開催された。

本報告では、フルードパワー技術に関するポスター講演の概要を紹介する。

2. フルードパワー技術関連の発表内容

2.1 概要

ポスター講演の中で、フルードパワーに関する発表は、空気圧関連25件、液圧関連10件、機能性流体関連3件である。また、これらの講演の中で、アクチュエータの基礎特性に関する講演13件、機器に関する講演2件、アクチュエータの応用に関する講演20件、そのほか3件であり、アクチュエータを用いた機器開発に関する講演が多くなっている。

2.2 空気圧関連

空気圧アクチュエータに関する講演では、ゴム人工筋に関する講演が14件に対し、そのほかの空気圧アクチュエータは9件となっている。以下に概要を紹介する。

稲葉らは、予備伸張による弾性エネルギーの蓄積に伴う筋の瞬時緊張を実現するメカニズムとして、モータ駆動腱と空気圧人工筋のハイブリッド駆動を提案している¹⁾。

塚越らは、既存の歩行器と人体を接続するため、Big-hanと称する装置の開発を行い、人間が安定して立位を保つための機構を検討している²⁾。

西川らは、空気圧人工筋を用いた多自由度5指ロボットハンドを試作した。そして、生物が柔軟な動作を行うために利用している生体ゆらぎを模倣した非モデルベース制御系を構築している³⁾。

中村らは、可変弾性要素として軸方向繊維強化型人工筋肉、可変粘性要素として磁気粘性流体（MR）ブレーキに着目した。そして、瞬発力発生手法による瞬発力の発生を確認することにより、跳躍を行う一脚ロボットを試作している⁴⁾。

細田らは、空気圧人工筋駆動での四足ロボットの高速走行を目的とし、Oncillaの機構を基にしたマツキベン型空気圧人工筋を動力源に応用した。そして、四足ロボットKenの問題部分を改良したTaKenを開発している⁵⁾。

山海らは、ゴム人工筋を有する二次元脚モデルの一定立位姿勢の安定性について、ゴム人工筋の特性がどのように影響しているのかを明らかにしている⁶⁾。

鈴森らは、PEMFC（Proton Exchange Membrane Fuel Cell）をFMA（Flexible Micro Actuator）に搭載することで、自立空圧アクチュエータを実現している⁷⁾。

佐藤らは、ラバーレス人工筋肉の伸縮動作回数に関する耐久性を調査した。そして、耐久性の向上に有効な素材や構造の改良方法について実験を通して確認している⁸⁾。

高岩らは、空気圧シリンダをアクチュエータとする多軸直交機構を用いた乳がん触診シミュレータについてその基本性能を検証している⁹⁾。

西岡らは、軽量化に着目したアクチュエータの開発に努めており、プラスチックフィルムにプリーツと呼ばれる折り込みを施すことで、屈曲形状を生

成するソフトアクチュエータを開発している¹⁰⁾。

2.3 液圧関連

油圧関連では、EHAに関する研究や油圧駆動ロボットの開発など、興味ある発表が多かった。以下に概要を述べる。

中村らは、可動部の形状が比較的単純でコンタクトシールによる内部漏れの抑制が容易な油圧シリンダを出力側に用いた直動型EHAを開発している¹¹⁾。さらに、EHAの圧力と速度の関係を陽に用いることで、モータの速度制御によって力制御を行うことを提案している¹²⁾。また、EHAを用いたロボットの足首関節機構の実現を目的として、直動型EHAの出力部に油圧ベーンモータの代わりに油圧シリンダを用いた構造を提案している¹³⁾。さらに、ロボットハンド駆動用の14軸直動群EHAの製作とその静特性評価を行っている¹⁴⁾。

玄らは、人間の運動メカニズムの探求ならびに医療福祉機器のシミュレータ構築を目的として、ヒューマノイドロボットRL-H1に取り付けることを想定した油圧式双腕ロボットの開発を行っている¹⁵⁾。また、不整地歩行を目的とした油圧式4脚ロボットRL-A1 (Ritsumeikan Leg, Animal Type1)の目標仕様、開発したシステム概要、動作実験結果について述べている¹⁶⁾。

水圧関連に関して、鈴木らは三連シングルベーン型の構造で270°の揺動角を持つ水圧揺動モータを提案している¹⁷⁾。

2.4 機能性流体関連

伊藤らは、安定性や不整地への対応能力、転倒防止機能などを備えた新しい簡易型歩行補助杖を開発することを目指して、MR流体とベローズを用いた支持脚の伸縮機構を考案している¹⁸⁾。

3. おわりに

本稿では、ROBOMECH2014におけるフルードパワー技術関連の発表概要の一部を紹介した。さまざまな応用事例が今後ますます増えることを期待したい。

参考文献

- 1) 中島, 上月, 白井, 浅野, 垣内, 岡田, 稲葉, “モータ駆動腱を用いた空気圧人工筋の予備伸張による初期加速度の増大”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論

文集, 1A1-C05

- 2) 永野, 駱, 塚越, “Big-hand:人体を安全に抱きかかえて立ち上がり動作を支援する装置”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1A1-G03
- 3) 井出, 西川, “ゆらぎを用いた多自由度5指ロボットハンドの指先位置制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A1-J04
- 4) 石原, 間島, 戸森, 中村, “空気圧人工筋肉とMRブレーキを用いた跳躍ロボットの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A1-K05
- 5) 稲田, 成岡, 清水, 細田, “空気圧人工筋駆動四足ロボットによる身体の弾性を利用した高速走行の実現”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A1-K06
- 6) 中西, 末岡, 杉本, 大須賀, 山海, “空気圧人工筋を用いた脚ロボットの関節剛性と立位安定性条件の関係について”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A1-Q06
- 7) 亀谷, 和田, 鈴森, “気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A2-O04
- 8) 齋藤直樹, 佐藤俊之, “ラバーレス人工筋肉の耐久性の評価と改良”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A2-P05
- 9) 松野, 高岩, 佐々木, “空気式多自由度アクチュエータを用いた乳がん触診シミュレータ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1P1-G01
- 10) 天瀬, 西岡, 安田, “螺旋状巻付き型極軽量ソフトアクチュエータの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A1-N05
- 11) 大月, 神永, 中村, “慣性負荷による直動型電気静油圧アクチュエータの動特性評価”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1P1-I05
- 12) 神永, 康, 中村, “モータの速度制御を用いた電気静油圧アクチュエータの力制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1A1-I04
- 13) 大月, 神永, 中村, “足首関節機構のための直動型電気静油圧アクチュエータの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1P1-I06
- 14) 康, 神永, 中村, “油圧トロコイドポンプ付シリンダブロックアクチュエータの特性評価”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1P1-I07
- 15) 井澤, 玄, “油圧駆動ヒューマノイドロボットの腕部の設計”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1A1-I01
- 16) 川端, 西, 鳥居, 北浦, 兼松, 玄, “油圧式4脚歩行ロボットRL-A1の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1A1-I02
- 17) 鈴木, 鳥居, 中尾, “水圧駆動用ベーン型270°揺動モータの開発および性能評価”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1A1-F06
- 18) 伊藤, 原田, 渡邊, “流体を用いた高齢者用歩行補助杖の開発と実験”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1P1-C01

(原稿受付：2014年8月3日)

会議報告

ACTUATOR14におけるフルードパワー技術研究

著者紹介



よし だ かず ひろ
吉田 和弘

東京工業大学精密工学研究所
〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259-R2-42
E-mail : yoshida@pi.titech.ac.jp

1989年東京工業大学大学院博士課程修了，同年同大学助手，1996年同大学助教授（現，准教授），2008年10月～2009年3月米国UCSB客員研究員，流体マイクロマシン，機能性流体の研究に従事，JFPS，JSME，IEEEなどの会員，工学博士。

1. まえがき

International Conference and Exhibition on New Actuators and Drive Systems (ACTUATOR 14) が2014年6月23～25日にドイツ，ブレーメンのブレーメン国際会議・展示場（Messe Bremen）（図1）において開催された。本イベントは，ニューアクチュエータに関する国際会議と展示会を併催するもので，2年ごとに同じ会場で開催されている。今回は1988年から数えて第14回に相当し，25周年の記念すべき回であった。

今回は，口頭発表97件，ポスター発表71件，合計168件の発表があった。セッションは，圧電／低パワー電磁／高分子／ERF/MRF／形状記憶合金／超磁歪／磁気形状記憶／マイクロのアクチュエータ，アクチュエータ／能動制御／ナノの制御，ハプティック／医用／宇宙への応用である。フルードパワー技術関連では，機能性流体関連が多く10件，油圧2件，空気圧2件，合計14件（発表全体の8%）の発表があった。以下では，各発表の概要を紹介する。

2. フルードパワー技術関連の発表内容

2.1 機能性流体関連

機能性流体関係では，レビュー1件，アクチュエータ3件，ダンパ5件，ハプティックデバイス1件，合計10件の発表があった。

レビュー講演として，MészárosとChoiは，磁界／電界で粘度が変化するMRF／ERFの技術動向を概観し，MRF関連ではショックアブソーバ，エンジンマウント，装具用ブレーキ，事故エネルギー吸収デバイスなど，ERF関連ではナノ技術などを用いた

ERF，ダンパ，アクチュエータ，触覚ディスプレイなどを紹介している¹⁾。

アクチュエータとして，Breitfeldらは，2個の2ポートERマイクロバルブを集積した6個のゴム製ベローズからなるぜん動運動式移動機構のため， $\phi 20\text{mm} \times 20\text{mm}$ のゴム製ベローズの設計，試作，特性実験と，大きさ $9 \times 2 \times 0.28\text{mm}^3$ の流路を有するERマイクロバルブの試作，特性実験を行っている²⁾。

Miyoshiらは，1本の配管で伝達する交流流量を同期して開閉するアクチュエータ部のERバルブで整流して供給する，アクチュエータ多数化に適したERマイクロフィンガシステムを提案し，MEMSプロセスを開発してフィンガ長さ1mmのシステムを試作し，その動作を実験的に確認している³⁾。

Kimらは，三角柱スリット電極対による不均一電界により生じるECFジェットを応用したマイクロポンプを，偏心した円筒形チャンバを有し加圧により屈曲する偏心チューブマイクロアクチュエータに集積したデバイスを提案し，MEMSプロセスを開発して試作し，その特性を実験的に解明している⁴⁾。

ダンパとして，Gerlachらは，油圧ダンパのピストン上のオリフィスをピストン内部に設置されMRFで制動されたピストンにより変化させる構造のハイブリッドMRダンパを提案し，シミュレーションと，新たに試作したMRFを用いた試作デバイスの特性実験によりその有効性を確認している⁵⁾。

Silgeらは，車両のセミアクティブサスペンションシステムのため，液圧シリンダを剛性の異なる2個の弾性チャンバにそれぞれMRバルブを介して接



図1 ブレーメン国際会議・展示場

続した構造で、各バルブのオンオフ制御でインピーダンスを変化させるアクチュエータを提案し、シミュレーションによりその有効性を示している⁶⁾。

Phuらは、MRマウントにおいて微小振幅、高周波数で生じる固定現象を回避するため、MRFを流路軸方向に可動の磁極とケースの間に流す構造で、MRFのフローモードとせん断モードを用いたデバイスを提案し、シミュレーションにより最適設計および特性評価を行い、その有効性を示している⁷⁾。

Ocanaらは、航空機の着陸装置のセミアクティブサスペンションシステムのためMRバルブを設計、試作し、使用するMRFの圧力、流量および印加電流の関係、および温度の影響を実験的に明らかにするとともに、シミュレーションによりシステムの有効性を確認している⁸⁾。

Jackelらは、インホイールモータを用いた電気自動車の安全性と乗り心地を向上するため、電磁石と、直動により磁気回路を切り替える永久磁石によりMRFに磁界を印加する構造のMRダンパを提案し、磁場解析によりその有効性を示すとともに、MRダンパの設計を行っている⁹⁾。

ハプティックデバイスとして、Ludwigらは、自動車において、禁止操作時に押せない感覚を運転者に伝え安全運転に貢献する押しボタンのため、永久磁石および電磁石でMRFに磁界を印加する構造のMRブレーキを設計、試作し、その発生力の静特性および動特性を実験的に明らかにしている¹⁰⁾。

2.2 油圧関連

油圧関連では以下の2件の発表があった。

Zoelsらは、圧電素子駆動の油圧ピストンに、2個並列のリリーフ弁を介した油圧シリンダ、および絞りを介した弾性チャンバを接続した構造で、圧電素子ののこぎり波印加電圧の向きで伸長、収縮を制御する機構、およびその人工筋アクチュエータへの応用などについて紹介している¹¹⁾。

Lentnerらは、航空機のアキシャルピストンポンプで生じる圧力脈動および振動を低減するため、圧電素子駆動のピストンによる発生圧力で脈動をキャンセルするデバイスを、構築した数学モデルによる最適設計に基づき試作し、シミュレーションおよび実験によりその有効性を確認している¹²⁾。

2.3 空気圧関連

空気圧関連では以下の2件の発表があった。

Devrekerらは、大動脈弁移植の低侵襲手術のため、柔軟な空気圧人工筋アクチュエータを用いた能動カテーテルを提案し、直径2.2mmのアクチュエータを開発し直径6mmの1自由度屈曲機構に応用してその特性を実験的に明らかにするとともに、それを2個接続した能動カテーテルを実現している¹³⁾。

Lipowskiらは、航空機やタービンロータの表面の流れの制御などのための空気圧噴流を用いたPulsed Jet Actuator (PJA) において、流体抵抗や慣性の影響を低減するため各噴流口に圧電バイモルフの

リード形バルブを設けた積層形PJAを提案し、新構造の設計を行っている¹⁴⁾。

3. あとがき

本稿では、ACTUATOR14におけるフルードパワー技術関連の発表の概要を紹介した。次回は2016年にドイツ、ブレーメンで開催予定である。

参考文献

- 1) Mészáros, D., Choi, S.-B. : Advances in Controllable Fluid Technology, 2012-2014, Interactive Conf. Proc. of Int. Conf. and Exhibition on New Actuators and Drive Systems (ACTUATOR14) (DVD-ROM), p. 64-69 (2014)
- 2) Breithfeld, A., Freyer, H., Ulrich, S., Wulfsberg, J., Bruns, R. : Elastomeric Bellows Hydraulic Actuator with Integrated Electrorheological Control Valves, *ibid*, p. 70-73 (2014)
- 3) Miyoshi, T., Yoshida, K., Kim, J.-W., Eom, S.I., Yokota, S. : Development of a MEMS-Based ER Microgripper Using Alternating-Pressure Source, *ibid*, p. 394-397 (2014)
- 4) Kim, J.-W., Satoh, M., Yokota, S., Edamura, K. : Micropump-Integrated Eccentric Tube Type Microactuator by Electro-Conjugate Fluid, *ibid*, p. 410-413 (2014)
- 5) Gerlach, T., Ruß, A., Böse, H. : Novel Hybrid Magnetorheological Damper, *ibid*, p.74-77 (2014)
- 6) Silge, M., Greiner-Petter, C., Sattel, T. : A Concept for Vehicle Suspension Systems with Variable Mechanical Impedance Based on Magneto and Electrorheological Fluid Actuators, *ibid*, p. 78-81 (2014)
- 7) Phu, D.X., Choi, S.-H., Kim, H.-C., Choi, S.-B. : Optimal Design of a New Magnetorheological Mount Using Flexible Valve-Type Structure, p. 82-85 (2014)
- 8) Ocana, M.I., Novillo, E., Zubietta, M., Cantero, C. : Capabilities of Magneto-Rheological Suspensions in Landing Gears, *ibid*, p. 488-491 (2014)
- 9) Jackel, M., Hansmann, J., Matthias, M., Melz, T. : Development of a Magnetorheological Damper with an in Two Ways Adjustable Magnetic Field for an Electrically Powered Car with Wheel Hub Motors, *ibid*, p. 493-496 (2014)
- 10) Ludwig, D., Lindner, M., Tille, T., Maas, J. : Miniaturized MRF-Based Pushbutton for Haptic Feedback in Automotive Applications, *ibid*, p. 443-446 (2014)
- 11) Zoels, W., Goedecke, A., Bachmaier, G. : The Piezohydraulic Actuation Principle - Recent Advancements from Ultrafast to Long-Stroke Drives, *ibid*, p. 130-133 (2014)
- 12) Lentner, K., Hermle, F., Christmann, M., Waitschat, A., Thielecke, F., Behr, R.M. : Piezo-Actuated Hydraulic Transducer for Active Noise Reduction, *ibid*, p. 301-304 (2014)
- 13) Devreker, A., Vander Poorten, E.B., Gijbels, A., Tran, P.T., De Praetere, H., Herijgers, P., Vander Sloten, J., Reynaerts, D. : Towards Fluidic Actuation for Catheter-Based Interventions, *ibid*, p. 173-176 (2014)
- 14) Lipowski, M., Schüller, M., Nestler, J., Otto, T., Geßner, T. : Development of Micro-Valves for Pulsed Jet Actuators, *ibid*, p. 572-575 (2014)

(原稿受付：2014年8月5日)

会議報告

FPNI 第8回 Ph. Dシンポジウムにおけるフルードパワー技術の研究動向

著者紹介



いちやなぎ たかよし
一柳 隆 義

防衛大学校機械システム工学科
〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20
E-mail: ichiyana@nda.ac.jp

2001年神奈川大学大学院博士後期課程修了。同年防衛大学校機械システム工学科助手。2014年同大学校准教授。現在に至る。流体伝播振動、流体計測の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

FPNI 第8回 Ph. Dシンポジウム (The 8th FPNI PhD Symposium on Fluid Power) が2014年6月11日から13日にフィンランドのラッペンランタ工科大学 (Lappeenranta University of Technology) で開催された (図1)。本会議は、Fluid Power Net International (FPNI) の主催で3年に一度開催されてきたが、今回よりASMEのFluid Power System and Technology Divisionとの共催となった。会議名の「Ph. Dシンポジウム」から、博士課程の大学院生のみを対象とした会議との印象を受けるが、主催者側によると、博士課程のみならずフルードパワー関連の研究を行う世界中の若手の研究者（修士課程の学生、ポスドク、企業の研究員など）を対象としているとのことである。第8回目となる今回の会議では、15ヶ国（27の研究機関）から参加者が集まり、2件の基調講演と若手の研究者による45件の研究発



図1 ラッペンランタ工科大学

表が行われた (図2, 図3)。

2. 研究の動向

本会議では、以下の5つのテクニカルトラックに沿って各セッションが行われた。

- Design in Fluid Power Systems and Components
- Modeling and Simulation in Fluid Power
- Hydraulic Hybrids in Transmission
- Coupled Simulation of Mechatronic Machines
- Control of Fluid Power Systems

ここでは、会議で報告された多数の興味深い研究についてその一部を紹介する。

パデュー大学（アメリカ）のMizellらは、38MPa以上で運転する斜板式ピストンポンプ・モータのピストンとシリンダーブロック間に着目し、ピストンとシリンダーボアの材質の組合せが効率に及ぼす影響をシミュレーションにより調べた¹⁾。



図2 セッションの様子



図3 コーヒーブレイク

サマーラ国立航空宇宙大学（ロシア）のBadykovaらは、天然ガスの供給システムにおいて騒音源の一つである減圧弁の動特性をシミュレーションにより解析した。この減圧弁は、スロットルオリフィスを利用したサイレンサが挿入されており、その減衰性能やサイレンサが制御特性に与える影響を明らかにしている²⁾。

ドレスデン工科大学（ドイツ）のIvantysynらは、鉱山掘削用のような大型エクスカベータのアクチュエータシステムに対して、図4の左側に示すような開回路とポンプの押しのけ容積制御の組合せにより、掘削作業サイクルにおける消費エネルギーを35%低減できることを確認している³⁾。

浙江大学（中国）のYeらは、タンデム型斜版式ピストンポンプの振動・騒音特性について、集中定数系モデルによる流体伝ば振動とFEMによる構造伝ば振動を連成させたモデルを構築し、斜板角度による影響をシミュレーションと実験により調べている⁴⁾。

ラッペンランタ工科大学（フィンランド）のLuostarinenらは、地下掘削用のホイールローダなどのOff-Highway用油圧ビークルのHILシミュレータを開発し、オペレータの運転スキルが油圧ビークルの消費エネルギーにどのように影響するかを検証している⁵⁾。このシミュレータは、ラボツアーの見学コースに組込まれており、図5のような大型の3方向スクリーンに加え、ヘッドマウントディスプレイやモーションセンサを用いたマン・マシンインターフェイスにより、オペレータの操作を正確に評価できるように工夫されていた。

3. おわりに

本稿では、フィンランドのラッペンランタ工科大学で開催された第8回Ph. Dシンポジウムの研究動向についてその一部を紹介した。参加者の大半は15の国から集まった大学院生や若い研究者であり、技術セッションのみならず、バンケットやソーシャルプログラムを通じて彼・彼女ら同世代間での国際交流や研究に対する活発な意見交換が頻繁に見受けられたことが非常に印象的であった。本会議は毎回場所を変えて開催されており、これまでの開催場所は、ドイツ、イタリア、スペイン、アメリカ、ポーランド、フィンランドであった。2017年に行われる次のシンポジウムの開催地はブラジルが予定されており、本会議が若手研究者の方々にとって、フルードパワーという共通話題を通して世界の同年代の研究者と交流できる良い機会であることを期待し

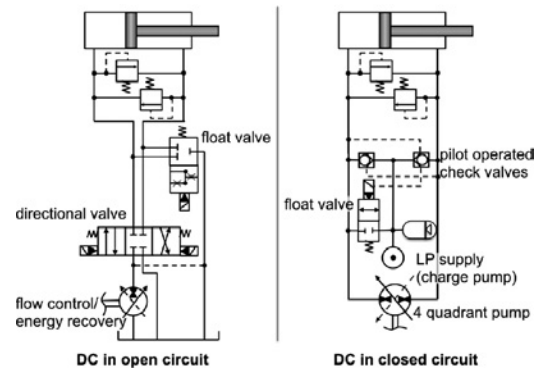


図4 2種類のDisplacement Control



図5 ラボツアーによるOff-Highway Vehicleシミュレータの見学

たい。

参考文献

- 1) Mizell, D., Ivantysynova, M. : Material Combinations for the Piston-Cylinder Interface of Axial Piston Machines : A Simulation Study, Proc. of the 8th FPNI Ph. D Symposium on Fluid Power, FPNI2014-7841 (2014)
- 2) Badykova, L., Stadnick, D., Afanasev, K., Igolkin, A. and Sverbilov, V. : Study on Dynamics of Air Pressure Reducing Valve With Focus on the Noise Attenuation Problem, Proc. of the 8th FPNI Ph. D Symposium on Fluid Power, FPNI2014-7856 (2014)
- 3) Ivantysyn, R. and Weber, J. : Novel Open Circuit Displacement Control Architecture in Heavy Machinery, Proc. of the 8th FPNI Ph. D Symposium on Fluid Power, FPNI2014-7806 (2014)
- 4) Ye, S., Xu, B. and Zhang, J. : Investigation Into the Effects of Index Angle on Fluidborne Noise and Structureborne Noise of a Tandem Axial Piston Pump, Proc. of the 8th FPNI Ph. D Symposium on Fluid Power, FPNI2014-7815 (2014)
- 5) Luostarinen, L. O., Åman, R. and Handroos, H. : Tool for Studying Effects of Human Operators on Energy Consumption of Working Hydraulics of Off-Highway Vehicle, Proc. of the 8th FPNI Ph. D Symposium on Fluid Power, FPNI2014-7825 (2014)

(原稿受付：2014年8月18日)

教室

入門講座「トライボロジー」

第3回：摩耗について

著者紹介



かざ ま とし はる
風 間 俊 治

室蘭工業大学大学院
〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1
E-mail: kazama@mmm.muroran-it.ac.jp

1988年横浜国立大学大学院修了。2005年 室蘭工業大学教授、現在に至る。主に、トライボロジー、キャビテーション、設計工学などの教育研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本トライボロジー学会、日本機械学会等の会員。博士（工学）。

1. はじめに

前回までに「トライボロジー」の「摩擦」と「表面」の基礎について述べてきた。今回は「摩耗」について話を続ける。

2. 摩耗について

2.1 摩耗の指標

摩擦に伴って固体表面部分に逐次減量が生じる現象を摩耗¹⁾という。その減少体積を摩耗量（摩耗体積）、滑り距離に対する摩耗量を摩耗率（摩耗速度）、荷重に対する摩耗率を比摩耗量、比摩耗量に硬さを乗じたパラメータを摩耗係数と定義する。これらを表1にまとめる。

2.2 摩耗の変化

図1は、滑り距離 L （または、しゅう動時間）と摩耗量 V の変化（摩耗進行曲線）の説明図である。同図の曲線の傾きを摩耗率（摩耗速度）と呼ぶ。曲線Ⅰは、摩擦開始後より相対的に高い摩耗率が生じ（初期摩耗）、距離（時間）の経過とともに低い摩耗率となる（定常摩耗）ケースである。油空圧機器を含めて、多くの機械でしばしば見られる摩耗の進行過程といえる。ただし、直線Ⅱのように摩耗率がほぼ一定となるケースや曲線Ⅲのように摩耗率が増加するケースもある³⁾。摩耗量のみならず、摩耗率の変化にも注意が必要である。

3. 摩耗の種類

摩耗は、摩擦の力学的条件、両摩擦材の性質、周囲の環境、熱や温度、物理的・化学的作用など、多くのパラメータに因ることを念頭に置くことが肝要である。摩耗の形態を一概に整理することは難しいが、代表的な分類例を表2に示し、以下に解説を加える。

3.1 凝着摩耗

はじめに、基本的なArchardの凝着摩耗モデルに触れる。図2に示すように、摩擦面に半径 a の円柱突起が n 個存在し、荷重 W で接触する突起（図2a）が距離 $2a$ を移動して、半径 a の円形凝着部において半径 a の半球状の摩耗粒子が発生（図2b）すると考える。滑り距離 L で発生する摩耗量 V は、その排除体積相当の摩耗粒子が確率 k で発生すると仮定すれば

表1 摩耗の指標（ H ：硬さ， L ：滑り距離， W ：荷重）

摩耗量，摩耗体積（Wear amount）[，摩耗質量]

V [mm³] [， M [mg]]

一定時間における体積 [質量] 減少量

摩耗率，摩耗速度（Wear rate）

$w = V/L$ [mm³/m, mm³/mm, mm²]

単位摩擦距離当たりの摩耗量

摩耗の進行速度の予測

比摩耗量（Specific wear rate）

$w_s = V/(LW)$ [mm³/(N・m), mm²/N, m²/N]

単位荷重，単位摩擦距離当たりの摩耗量

摩耗の過酷さの評価

異なる試験条件や材料間の耐摩耗性の比較

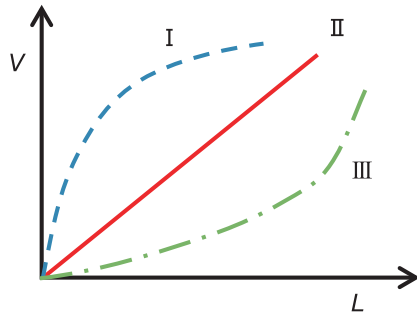
摩耗係数（Wear coefficient）

$K = HV/(LW)$ [無次元量]

摩耗粒子の発生確率に相当

通常， $K < 1$ であり，一般に以下で分類できる

$K < 10^{-4}$ ：マイルド摩耗， $K > 10^{-4}$ ：シビア摩耗


図1 滑り距離 L と摩耗量 V

$$V = kn \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi a^3 \right) \frac{L}{2a} = \frac{\pi a^2 k L n}{3} \quad (1)$$

いま、突起の真実接触点で塑性変形をしているとすれば、接触圧力は軟質材側表面の塑性流動圧力に等しいと置けるので、硬さ H を用いて

$$n \pi a^2 = W/H \quad (2)$$

したがって

$$V = \frac{k}{3} \frac{LW}{H} \quad (3)$$

すなわち、摩耗量は滑り距離と荷重に比例し、硬さに逆比例することになる。法則としてまとめると

- 1) 摩耗量は荷重に比例する
- 2) 摩耗量は摩擦距離に比例する
- 3) 摩耗量は軟らかい方の摩擦面硬さに逆比例する

つぎに、図3の模式図を用いて、凝着摩耗による摩耗粉の発生過程（移着成長モデル）²⁾を紹介する。しゅう動面の突起部が接触し（図3a）、内部破断により生じた小片が相手面に移着する（図3b）。これを移着素子という。移着素子は軟らかい面に生じやすいが、表面の凹凸形状や内部欠陥などにより硬い面に生じる場合もある。しゅう動運動により他の移着素子と集合を繰り返して移着塊となり、大きく成長して移着粒子を形成する（図3c）。

この粒子に摩擦力のモーメントが加わり、脱落してこの系の外に排出されたものが摩耗粒子となる。なお、凝着摩耗の激しい場合をシビア摩耗、穏やかな場合をマイルド摩耗という。

3.2 アブレイシブ摩耗

アブレイシブ摩耗は、切削摩耗とも呼ばれる。これを図4のようにモデリングして考えてみよう。半頂角 θ の円錐突起が深さ d で食い込んで距離 L を滑るとき、摩耗量 V は

$$V = k \cdot n \cdot d^2 L \tan \theta \quad (4)$$

接触圧力は、真実接触部は円錐の片側になるとして、前節の式（2）の導出と同様に

$$\frac{n \pi (d \tan \theta)^2}{2} = \frac{W}{H} \quad (5)$$

したがって

$$V = \frac{2k}{\pi \tan \theta} \frac{LW}{H} \quad (6)$$

表2 摩耗の形態

凝着摩耗（Adhesive wear）

真実接触部の凝着結合の破壊に起因
概ね一般的

アブレイシブ摩耗（Abrasive wear）

硬質粒子／硬質表面突起の引掻き作用に起因
激しい摩耗、機械のトラブルの主要因

疲労摩耗（Fatigue wear）

摩擦接触の繰返しによる表面近傍の疲労に起因

腐食摩耗（Corrosive wear）

雰囲気との化学的作用と摩擦の機械的作用に起因

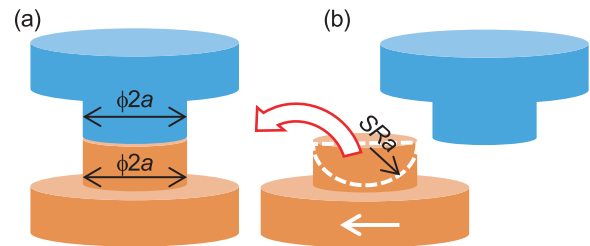


図2 Archard の凝着摩耗モデル

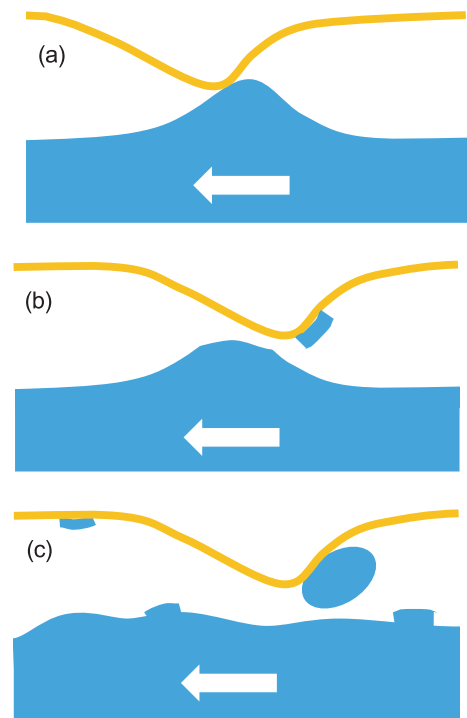


図3 移着成長モデル（a：接触，b：移着素子の発生，c：移着粒子の形成）

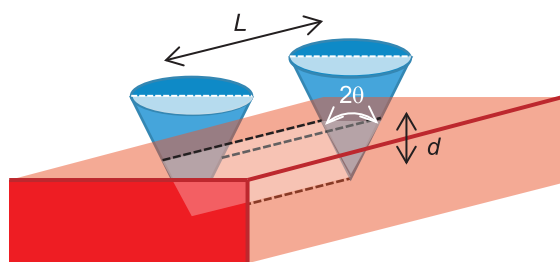


図4 アブレイシブ摩耗モデル

つまり、上述の凝着摩耗の1)～3)に以下の項目が付け加わる。

4) 摩耗量は突起の鋭さに比例する

なお、摩耗粉や砂粒などの固体粒子（コンタミナント）を介したしゅう動面を対象とする場合は Three-body wear の問題として取り扱われる。

3.3 疲労摩耗

疲労摩耗は、転がり軸受の転動面や歯車の歯面のように、滑り摩擦に比して転がり摩擦が支配的な場合に生じる。垂直方向の繰返しの圧縮応力と引張り応力による表面の疲労破壊である。

たとえば、転がり軸受ではフレーキング（軸受が荷重を受けて運転されたとき、転がり疲れによって軌道面や転動体の表面がうろこ状に剥れる現象）やピーリング（転がり接触の繰返しによって表面が数mm程度の深さで剥離する現象）が、歯車ではピッチング（歯面に生じる小孔であり、表面から亀裂が入り孔に成長する損傷）やスポーリング（高い応力の繰返しにより表面下内部で疲れが起こり、大きな金属片が表面から脱落して生じる損傷）¹⁾が、たびたび見られる。

3.4 腐食摩耗

腐食摩耗は、化学摩耗とも呼ばれる。摩擦面と気体や液体の雰囲気との化学反応が支配的な場合に生じる。

4. ク イ ズ

これまでと同様に、入門、基礎、応用の問題にチャレンジしてみてください。

4.1 入門レベル【身のまわりの摩耗】

我々の身のまわりで生じている摩耗について、可能であれば避けたい場面と、逆に利用している場面を挙げてみよう。

4.2 基礎レベル【チョークの摩耗】

チョーク（直径 11mm、長さ 74mm）をある日の講義で使用したところ、終了時に半分の長さになった。

正味の筆記時間を30分とすると、摩耗率はどの程度であったと考えられるか。

4.3 応用レベル【摩耗仕事】

摩耗形態図（Wear map）について調べてみよう。

附録

略解 1

避けたい例：靴底やゴムタイヤのすり減り、衣類のすり切れ、刃物の切れ味低下、歯の摩耗（咬耗）など

利用している例：チョーク、鉛筆、消しゴムなど

略解 2

たとえば、1秒で10cmの運筆とすれば、滑り距離は30分で累計180mとなるから、摩耗率 w は

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \frac{l}{2} = \pi \frac{11^2}{4} \frac{74}{2} = 3.52 \times 10^3 [\text{mm}^3] \quad (7)$$

$$w = \frac{V}{L} = \frac{3.52 \times 10^3}{180} = 1.95 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{m}} \right] \quad (8)$$

略解 3

Lim & Ashby (1987) のWear mapを図5に例示する。図中のIは焼付き、IIは塑性変形が支配的な摩耗、IIIは超マイルド摩耗、IVはマイルド酸化摩耗、Vはシビア酸化摩耗、VIは溶融摩耗。また、 p^* ：無次元圧力 $=W/(AH)$ 、 U^* ：無次元速度 $=aU/\alpha$ （ A ：見掛けの接触面積、 a ：ピンの半径、 H ：硬さ、 U ：滑り速度、 W ：荷重、 α ：温度伝導率）。

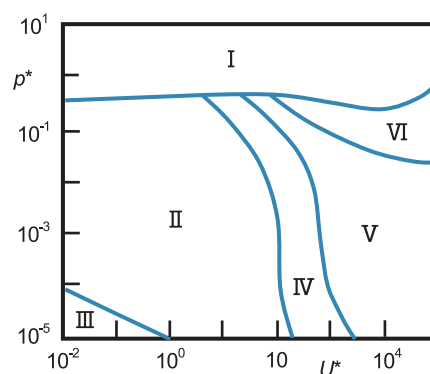


図5 Wear map の例（鋼，ピンオンディスク試験）

参考文献

- 1) 日本トライボロジー学会，トライボロジー辞典，養賢堂（1995）
- 2) 笹田直：摩耗，養賢堂（2008）
- 3) 佐々木信也，志摩政幸，野口昭治，平山朋子：はじめてのトライボロジー，講談社（2013）

（原稿受付：2014年7月13日）

トピックス

特許文献を調べる・特許電子図書館の活用5 …類似文献の検索1

著者紹介



き はら かず ゆき
木原和幸

工業所有権協力センター
〒135-0042 東京都江東区木場1-2-15
E-mail: k-kihara@sctv.jp

1974年神戸大学工学部計測工学科卒。東京計器入社、パワーコントロール研究室長、油空圧技術部長等を経て、現在に至る。比例弁、サーボ弁、ピストンポンプ等の油圧機器とそれらを制御するコントロールシステム等の開発に従事。日本フルードパワーシステム学会会員。

1. はじめに

前稿までに国際特許分類（IPC）および日本における特許の分類の大まかな概要を紹介した。本稿では具体的な事例を想定して、いくつかのアイデアが発明になる可能性があるか否かを探っていく方法を示す。テーマコードだけである程度どのようなものがあるか推定できるようになっているが、これはある程度、検索を重ねた経験者でないと無理があると考え。たとえば、流量調整弁は圧力補償機能であることはJISB0142に定義されているように自明であるが、テーマコードの解説の中には圧力補償付流量調整弁の名称が用いられている。この名称は些細なことであるが、定流量弁も含め、テーマコード3H060安全弁Ⅱ（平衡弁、過剰流出弁）に分類されている。このテーマコード名から推定できるだろうか。さらに流量制御であれば、構造からは3H052リフト弁（流れに面して開閉する弁）、3H053スライド弁（流れに直交して開閉する弁、たとえば、スプール弁）もある。駆動方式からは3H056流体制御弁、3H062電気駆動弁、3H106磁気駆動弁もある。特許の請求項の内容により、付与されているFIが変わる。それに対応することになる。

ここでは、初めての人でも簡単に組みめる一つの方式を紹介する。

2. 検索画面

特許電子図書館¹⁾に示されている冒頭の表示画面

の一部に、表1に示す検索メニューがある。

表1 検索メニュー

初心者向け検索	商票検索
特許・実用新案の検索	意匠検索
経過情報検索	審判検索

特許・実用新案の検索を選択する。下記、12の項目が表示される。

- ①特許・実用新案公報DB
- ②特許・実用新案文献番号索引照会
- ③公報テキスト検索
- ④公開特許公報フロントページ検索
- ⑤特許分類検索
- ⑥パテントマップガイダンス（PMGS）
- ⑦パテントマップガイダンス（旧）
- ⑧PAJ検索（英語表示）
- ⑨FI/Fターム検索（英語表示）
- ⑩外国公報DB
- ⑪審査書類情報照会
- ⑫コンピュータソフトウェアデータベース（CSDB）
検索

これらの一部を使用して、具体的なアイデアに対応して進める。

3. 事例 1

低騒音に関連し、ピストンポンプにおける適用を検討する。③公報テキスト検索を選択する。公報種別は公開特許公報にチェックマークを付け、検索項目選択は公報全文とする。キーワード検索画面の一部を表2に示す。

表2 キーワード検索

公開特許公報（公開、公表、再公表）

検索項目選択	検索キーワード
公報全文（書誌を除く）	低騒音
公報全文（書誌を除く）	ピストンポンプ
公報全文（書誌を除く）	比例

一覧表示はヒット件数1,000件以内でないと表示できないのでキーワードで絞り込む必要がある。

- 1) 低騒音 26,067件
- 2) 低騒音×ピストンポンプ 104件
- 3) 低騒音×ピストンポンプ×比例 26件

ここで、画面下部の（一覧表）を選択すると一覧表示画面に切り替わる。

このキーワードによる方式は漏れが多いと考えられる。たとえば、低騒音はローノイズかもしれないし、騒音低減かもしれない。ゆえに、ここで絞り込めた特許文献のFI、Fタームを参照する。ここでは、3)の26件から検討しているアイデアに近いものを選ぶ。

一覧表示（出願人は未表示）は表3となる。たとえば、11の公報、特開平10-331759斜板式液压機械を選択する。この文献の課題は、小傾転、高圧、高回転下で小型、軽量、高効率および低騒音の斜板式アキシャルピストンポンプ・モータの実現であるので、類似文献と判断する。文献の表示と上段に（経過情報）などが表示される。（経過情報）を選択すると（基本項目）の画面が表示される。下段の（出願情報）を選択する。テーマコードは3H070往復動ポンプと3H084液压モータである。ピストンポンプに限定し、3H070を選択する。FIはF04B1/00-7/06であり、付与されているFIはF04B 1/22、2組以上のシリンダまたはピストンを有するものとなっている。FIはピストンポンプの構造に関するものであるので、検討しているものに合うものを選ぶことになる。付与されているFタームの中で、低騒音に関係するものはCC03である。ただし、これだけではなく、低騒音に関係するFタームはCC00の目標・効果の中にある。

CC01 ・騒音、振動防止

CC02 ・機械的な原因に基づくもの

CC03 ・流体力学的な原因に基づくもの

CC04 ・キャビテーション防止

がある。上記の・と・・・は・が全体集合であり、・・・が・の部分集合を示す。すなわち・の数が増えるほど、より限定された内容となる。

⑤特許分類検索を選択するとFI、Fターム検索ができる。テーマコードに3H070を入力し、検索式の欄をCC03とし、（検索実行）を選択するとそのヒット件数が表示される。

CC01 ヒット件数954

CC02 ヒット件数315

CC03 ヒット件数488

CC04 ヒット件数227

\$CC01 ヒット件数183

\$CC01はCC01が直接付与されているものを示す。

CC01=\$CC01+CC02+CC03となる。

（リスト）を選択すると、表3と同様の一覧表示となる。

件数が多い場合は、ほかの特徴も加味して、ヒット件数を絞り込む。たとえば検索式をAA01*\$BB04*CC02とするとヒット件数は76となる。なお、AA01は作動流体が油、BB04は型式がアキシャル型（例、斜板）である。

表3 一覧表示

	公報番号	発明の名称
1	特開2014-012559	製品ディスペンサシステム
2	特開2013-252850	車両の回生ブレーキ装置を運転するための方法および車両の回生ブレーキ装置のための操作装置
3	特開2013-209990	内部圧力吸収部材を有するポンプ及びポンプヘッド
4	特開2009-257288	可変容量型ポンプ
5	特開2006-213190	作業車両の制御装置
6	特開2006-213188	作業車両の制御装置
7	特開2006-057613	油圧ポンプ
8	特開2003-202001	可変容量型流体装置と同流体装置を備えた作業機
9	特開2003-156005	ポンプ回転制御加压装置
10	特開2000-303837	冷却用ファンの駆動制御装置
11	特開平10-331759	斜板式液压機械
12	特開平10-166199	液压駆動式塑性加工装置
13	特開平10-141213	斜板式可変容量ピストンポンプ
14	特開平08-312648	油圧ポンプモータの主軸すべり軸受
15	特開平07-137250	超音波プリンタ
16	特開平05-321815	液圧ポンプモータ
17	特開平05-169966	車両用暖房装置
18	特表2013-521676	渦電流トラップ付きRFIDシステム
19	特表2012-505370	製品ディスペンシングシステム
20	特表2011-510360	製品ディスペンサシステム
21	特表2010-538207	内部圧力吸収部材を有するポンプ及びポンプヘッド
22	特表2005-517611	車両用の油圧システム、同油圧システム及び補助ユニットを備えた車両
23	特表2000-509123	逆止弁タイミング装置を備えた低ノイズ油圧ポンプ
24	特表平10-505891	少なくとも1本の液圧式軸を備えた装置
25	再表2010/098399	除振装置
26	再表2009/123047	建設機械の油圧回路

4. 事例 2

低騒音に関連し、リリーフ弁における適用を検討する。キーワードを表4に示す。

表4 キーワード検索

公開特許公報（公開，公表，再公表）

検索項目選択	検索キーワード
公報全文（書誌を除く）	低騒音
公報全文（書誌を除く）	リリーフ弁

ヒット件数は104件である。表5に抜粋する。

表5 抜粋

	公報番号	発明の名称
1	特開2014-058981	エンジン制御装置
2	特開2013-100823	エンジン制御装置
3	特開2013-068011	油圧作業機械の駆動装置
21	特開2009-162349	リリーフ弁

21の公報，特開2009-162349リリーフ弁を選択する。この文献の課題は，異音の発生を十分に抑制できるリリーフ弁の提供である。この文献を調べるとテーマコードは3H059安全弁I（リリーフ弁），FIはF16K17/00-17/168であり，付与されているFIはF16K17/04G片側の過剰圧力によって開口するもの，片側の不十分な圧力によって閉口するものであり，さらに弁体がスプリング機能を有するものである。F16K17/04Zは片側の過剰圧力によって開口するもの，片側の不十分な圧力によって閉口するものであり，さらにそのほかのものである。もう一つのテーマコードは3H066弁の細部（II），FIはF16K39/00～F16K51/02Zであり，付与されているFIはF16K47/02J水撃または騒音防止用で弁がリリーフ弁であるものとなっている。

3H059におけるFタームにおいて，低騒音に係るものは

BB37 ・弁体のチャタリング防止・振動防止
ヒット件数645

BB38 ・騒音防止
ヒット件数522

BB37+BB38のヒット件数は1,005である。すなわち，両方のFタームが付与されているものが162件ある。件数が多い場合は，ほかの特徴も加味して，

ヒット件数を絞り込む。たとえば検索式をAA06*BB38とするとヒット件数は120となる。なお，AA06は弁座との係合部が円錐のものである。

3H066におけるFタームにおいて，低騒音に係るものは

BA32 ・騒音防止
ヒット件数1,283

BA33 ・振動防止
ヒット件数706

BA34 ・弁体のチャタリング防止
ヒット件数213

なお，FIも低騒音に係るものである。

F16K47/02J水撃または騒音防止用で弁がリリーフ弁であるものであり，検索式はF16K47/02@Jとアルファベットの前に@を入れる。ヒット件数は178である。

なお，ヒット件数を絞り込むときは，たとえば，F16K47/02@J*BA32とすると108件となる。

5. おわりに

本稿ではピストンポンプあるいはリリーフ弁において低騒音に関するアイデアを有する人が，特許電子図書館のデータベースから類似案件を見出す方法を示した。もちろん，新たな機構を考案したい人が，過去の文献を理解することにより，より良いものを考案するために用いることが可能である。

具体的に文献を見出す方法は，最初にテキスト検索により，類似文献を文献名称，課題などから見出し，どのようなFI，テーマコード，Fタームが付与されているか判断して，参考となる文献を検索する方法である。なお，本稿をより良く理解するために，前稿までの特許文献を調べる・特許電子図書館の活用¹⁾，²⁾，³⁾および⁴⁾を参照されたい。

参考文献

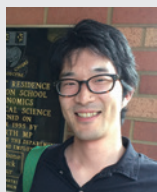
- 1) 特許電子図書館 <http://www.ipdl.inpit.go.jp/homepg.ipdl>
- 2) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用1・・・特許の基本，フルードパワーシステム，Vol. 44, No. 4, p. 241-243 (2013)
- 3) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用2・・・特許の基本，フルードパワーシステム，Vol. 44, No. 6, p. 362-364 (2013)
- 4) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用3・・・日本の分類・テーマコード1，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 2, p. 81-83 (2014)
- 5) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用4・・・日本の分類・テーマコード2，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 4, p. 184-186 (2014)

（原稿受付：2014年7月30日）

トピックス

英国駐在記

著者紹介



やま だ ひろ あき
山 田 宏 昭

Kawasaki Precision Machinery (UK) Ltd.
E-mail: hyamada@kpm-uk.co.uk

早稲田大学大学院修士課程修了後、外資系企業数社を経て2009年(株)カワサキプレシジョンマシナリ（現、川崎重工業株式会社精密機械カンパニー）企画管理部入社。2013年9月よりKawasaki Precision Machinery UK Ltd.へ出向、現在に至る。

1. はじめに

2013年9月から英国デボン州プリマスに拠点を置く、川崎重工業の欧州における油圧機器製造販売拠点Kawasaki Precision Machinery UK Ltd.に出向。言葉もままならない状態から始まった英国での駐在生活も気がつくとも一年が経過していた。ここでは英国駐在記と題して、当地での生活について以下で紹介したいと思う。

2. 英国について

グレートブリテンおよび北アイルランド連合王国（グレートブリテンおよび北アイルランドれんごうおうこく、英：United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland）、通称英国は、イングランド、スコットランド、ウェールズ、北アイルランドの4つの「カントリー」から構成される立憲君主制国家であり、英連邦王国の一国である。

国土面積は約24.3万平方キロメートルで日本の約3分の2倍、人口は約6,180万人で日本の約半分、首都ロンドンには約1割以上の760万人が住んでいるといわれている。小職が駐在をしているデボン州のプリマス市は、人口20万人を抱える南西イングランドの主要都市であり、ロンドンから約350キロに位置する。

緯度は北緯54度（日本は北緯36度）であり、サハリン（樺太）がおおよそ同じ緯度にあたる。そのため、夏場の日是非常に長く、夜の9時から10時まで明るい（写真1）。一方で、冬はその逆に日照

時間がとても短くなり、朝は暗いうちから出社し、帰社するころにはあたり一面が真っ暗になる。

気候は、メキシコ湾流の影響を強く受けるため、上述のように緯度がきわめて高いにも関わらず温暖である。

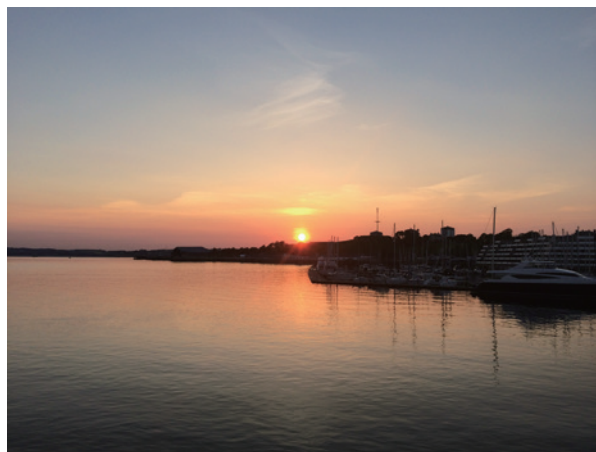


写真1 白夜6月23日21時30分撮影

3. 英国における生活

3.1 英国の天気

英国の夏は、上記のように日が長く、天候は概して安定している。しかし、9月ごろに入ると、気候が様変わりし、雨勝ちになるとともに非常に移ろいやすくなる。晴れたと思ったら、突然雷雨になり、そしてまた薄日を見せるその様は、「一日の中にすべての四季がある」という言葉で形容される。そのため、日本では雨の日に、当然のごとくさしていた傘も、今となっては英国人に倣ってあまりささなくなった。雨が降っても、しばらくすればいずれ収まる、という経験則があるからだ。また、こちらでは雨のときには、傘代わりにフードを被る人が実に多いように思える。実際、シャワーと呼ばれる一時的な小雨が多い英国ではフードは実に重宝する。英国に来て初めてフードのそのような実用的機能に気づかされた。ところで、英国はとにかく雨ばかりだといわれるが、実際には一日中雨が降ることはめったに

なく、年間降水量を日本と比較すると、日本よりもはるかに少ない¹⁾。

3.2 大雨による被害

しかし、今年の始めは事情が少し例年と違った。かつて例をみないほどの大雨が連日に渡り英国中を襲い、多くの地域で洪水に見舞われた。小職が駐在している南西イングランドデボン州においても甚大な被害があり、鉄道の線路が海に陥落した。復旧するまでは、鉄道は運休となり、それは数ヶ月に渡って続いた。日本とは異なり、復旧への対応は遅々としたものであったが、驚くべきはそうした対応の遅さに対する英国人の「寛容さ」だった。この地域に限って言えば、バスを除いた唯一の公共交通機関である鉄道の運休状態が数ヶ月続いたわけだが、もし日本で同じ状況になったとしたら、鉄道会社に早期復旧に向けて各方面から大きなプレッシャーがかかることだろう。しかし、ここではそのようなことはほとんど聞かない。時間に対してはことさら寛容な英国人の姿を見た気がした。なお、英国人は時間に対する「寛容さ」を他人に対してと同じか、それ以上に自分自身に対しても寛容さを持っている。

3.3 食生活

英国と聞いた際、多くの人が思い浮かべるのが、その料理のクオリティであり、それは国際的にも有名だ²⁾。確かに、野菜は、くたくたになるまで加熱処理が施されていることは多々あるし、パスタに至ってはアルデンテで出てくることは稀である。味付けは下味処理がなく単調であり、多くのレストランやパブのテーブルには各種調味料が置かれ、お客が自ら味付けをするシステムがとられている（もちろん、きちんとした料理を出すお店もあります）。供された料理に調味料を加えるのは、調理人に対する冒涇かとさえ思えるが、英国においては至って一般的なことである。加えて、当地の料理は一般にボリューム満点であり、摂取カロリーに気をつけないと肥大化することは必至である（写真2）。

ところで、英国ではお菓子をお弁当として持ってくる人を良く見かける（写真3）。栄養素を十分に摂取できる食事には到底思えないし、日常的にこのような食事をしているのだとすると、繊細な味覚は持ち得ないのだろうと思える。社内でもとりわけ若年になるアプレントイス（徒弟）が昼食にこのようなものを食べていることから、食産業を含めて英国の将来に不安を感じざるを得ない。

上述の諸々の事情から、外食から次第に小職の足は遠のき、自炊を基調とした食生活を営んでいる。その際、我々日本人にとって重要になってくるのが、調味料を含めた日本食材がどれだけ手に入るかとい



写真2 名物フィッシュアンドチップス



写真3 イギリス人のお弁当の一例（お菓子、果物、ジュースの組み合わせがオーソドックス）

うことだ。生憎だが小職が駐在するプリマスでは、「純粋な」日本食スーパーはない。そのため、数ヶ月おきに、日本食材を求めて片道3時間半をかけてロンドンへ足を伸ばしている。流石、日本人駐在員とその家族で4万人が生活し、留学生も2万4千人にものぼるだけあり、ロンドンには数多くの日本食材店がある。さらに、居酒屋、日本語の本屋、美容院なども充実しており、おおむね日常生活に困ることではないのではなかろうかという印象である。

3.4 パブの文化

英国といえばパブである。所謂大衆的な居酒屋という位置づけであり、気軽に入ることができる（写真4）。店にもよるが大抵いくつかの種類のビールを取り揃えている。諸説あると思うが、一般的には英国のビールといえばエールではなかろうか。特徴としては、日本でお馴染みのラガーとは異なり、泡は少なく、風味はフルーティ、そしてキンキンに冷えたものが出てくることは例外で、生ぬるいものがお出ましすることもよくある。これを片手にしながら、立ちながら何時間もしゃべり続けるのが英国でよく見られる光景だ。日本人は一般的にグラスを空けるのが早いが、英国人は一杯のビールを中々空けることはない。ぬるくなると味がイマイチなラ

ガーでは、とてもできない飲み方であるが、ぬるくなってもうまみがあるエールだからこそ成り立つ飲み方なのかもしれない。さらに、日本人と異なり、飲む際には、つまみをほぼ食べないのも彼らの飲み方の特徴だろう。我々日本人からすると、胃腸に負担を与える不健康な飲み方のように思えるが、同僚と共に飲み会に行くと毎度のようにつまみなしになる。以前、同僚につまみはないのかと聞いてみると、“Eating is cheating.”と言われたことがある。意味を聞いてみると、「食べるのは浮気。飲み会ではひたすら飲むべし」だそうである。そして彼に言わせると、飲みながらつまみを食べるなんて不健康極まりないそうである。飲み方だけでは一概には言えないが、一般的な英国人と日本人の体型を見比べれば、どちらがより健康的かは推して知るべしといったところか。



写真4 パブの風景

3.5 美容院事情

続いて、度々失敗談を耳にする英国美容院事情についてご紹介したい。そもそも英国の美容院はなぜ評判が悪いのだろうか。その理由の一つは、どうやら日本人と英国人の髪質の違い関係するようである。日本人と英国人の髪の質は異なるとよく言われ、そのため、髪に関わる悩みやトラブルも両者の間では異なるようだ。日本人の髪は、コシがあり太く、湿気のある日は髪のボリュームを抑えたいという人が多い。一方で、英国人の髪の毛は細くて柔らかいた

め、ボリュームを出し難い。そのため、概してボリュームを出す髪型が英国では好まれるようだ。だとすると、特段リクエストをしないと、ボリュームアップするような髪型にされそうだ。

赴任して久しく美容院へ行っていなかったが、意を決してある日美容院へ足を踏み入れた。必要以上にボリュームを出すような髪型にされないようにするために、念のため、写真を持参して行った。しかしながら、切り始めてもらってから数分し、鏡に目を向けると、髪型は写真とは似つかぬヘルメットのようなものになっていた。どうやらボリュームを出す、出さないという次元ではなかったようだ。しかし、切られてしまったものは仕方がない。矢継ぎ早に細かな指示を与え続け、1時間半ほどをかけて「満足のいく」髪型に仕上げた。もちろん、冷や汗をかきながら髪を切ってもらったのは初めてであったが、慣れない英語を駆使して、妥協をせずに積極果敢に英国人に挑み、結果として意図を伝えることができたのは、個人的に大変意義深い経験となった。またその副産物として、美容師さんと仲良くなれた。どうやらいろいろと指摘をしてもらえたのが嬉しかったようである。

4. おわりに

雑記という形でいくつかのトピックについて書かせて戴いた。知られているようで意外と日本では知られていない英国の姿について少しでも提供できたならば幸甚である。

【脚注】

- 1) 年間降水量は、ロンドンと東京でそれぞれ611mmと1,446mm. http://www2m.biglobe.ne.jp/ZenTech/world/infomation/kion/uk_london.htm
- 2) かつてフランスのシラク（元）大統領は、英国料理のことをさして、「あんなまずい料理を作る国民は信頼できない」と強烈な皮肉とも本音とも取れる発言をしている。 <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/4649007.stm>

（原稿受付：2014年8月8日）

研究室紹介

九州工業大学 田中・瀧脇・清水研究室

著者紹介



しま だ あい こ
嶋 田 愛 子

九州工業大学大学院情報工学府情報工学専攻
機械情報工学分野（博士後期課程1年）
〒820-8502 福岡県飯塚市川津680-4
E-mail: shimada@vortex.mse.kyutech.ac.jp

本研究室で修士号を取得、その後博士後期課程に進学、非定常運動を行う壁面近傍に形成される渦に関する研究に従事。

1. 九州工業大学の紹介

1909年に本学の前身である私立明治専門学校が開校し、戦後1949年に国立大学として九州工業大学が設立された。2009年には創立100周年を迎え、記念式典も行われた。現在、九州工業大学は、工学部のある戸畑キャンパス、情報工学部のある飯塚キャンパス、生命体工学研究科のある若松キャンパスの3つのキャンパスで構成されている。

私たちの研究室のある飯塚キャンパスは、1986年に設置され5つの学科(機械情報工学科・知能情報工学科・電子情報工学科・システム創成情報工学科・生命情報工学科)がある。機械情報工学科について以下に示す。近年デジタル技術の普及に伴い機械そのものがコンピュータを内蔵し、それを制御するための情報技術が必要になってきたばかりでなく、製造する機械も複雑になってきた。そのため機械を製造する方法も、またコンピュータを使って、付加価値の高い製品を、迅速、かつ、低コストで作製する必要がある。これらのことから、従来の機械工学に加えて情報工学との融合が重要であり、本学科では設計・製造の基礎である機械工学とそれらをサポートする情報技術の統合をはかり、社会全体に大きなインパクトを与える人材と技術を産み出している。

飯塚キャンパスのある飯塚市は、福岡県の中心部にあり、江戸時代は長崎街道の宿場町の一つとして、明治時代には石炭産業の町として栄えたとても歴史のある町である。また、現在放映中のNHK朝の連

続ドラマ「花子とアン」の柳原白蓮は石炭王の一人である伊藤伝右衛門とこの地に住んでいた。旧伊藤伝右衛門邸は本校から約1kmのところであり、飯塚市内に残る数少ない石炭遺産である。また炭鉱王伊藤伝右衛門の功績を伝える唯一の文化遺産でもあり、ドラマの効果により前年比3倍以上の入館者数となっている。このような歴史情緒溢れ自然豊かな飯塚の雰囲気の中で日々勉学に励んでいる。

2. 研究室の紹介

田中・瀧脇・清水研究室は情報工学部機械情報工学科にある研究室の一つであり、本学科においてとても歴史のある研究室である。本研究室では、平成26年度は社会人ドクターが1名、博士後期課程2名、博士前期課程16名、学部生12名が所属し、教授の田中先生、准教授の瀧脇先生、助教の清水先生、技官の肥後先生が在籍する。図1に日々の研究室の風景を示す。研究室では主に2～3人のグループで研究を行っており、各グループでのディスカッションだけではなく、研究の枠を超えたディスカッションも積極的に行われており、各研究についての知識や技術の共有化とさまざまな研究を通してのおのの研究への知見を広げている。

本研究室には、学部生、院生がそれぞれ本拠としている各部屋の他に、実験室、サーバールームがある。実験室には回流水槽、高度流体可視化計測システムで用いる高速度カメラやNd:YLFレーザーなどがあり、非定常運動を行う翼周りの渦や蝶の翅周りの渦構造に関する研究を行っている。ほかには、導電性高分子ソフトアクチュエータに関する研究も行っており、多数の薬品やポテンショガルバノスタット、電子天秤を用い、低電圧で駆動音のしない次世代のアクチュエータ開発に向けた実験を行っている。図2に実験室の写真を示す。また、本研究室には30台近くの数値解析用の計算機と相当数のソフトウェア・ライセンスがある。各研究につき最低一つは計算機が支給されており、おのの研究グループはその計算機を用いて研究を行っている。

上記したように、本研究室では主に流体が関連す

る諸問題についての研究を行っており、飛翔生物の周りに生じる渦流れに関する研究や非定常運動を行う翼周りの渦流れに関する研究、流体と構造の連成についてや油圧や空気圧に関するシステム動特性についてのさまざまな研究を行っている。以下に油圧振動に関する研究を紹介する。



図1 研究風景



図2 実験室

3. 研究紹介 (油圧回路, 油圧弁を中心として)

3.1 油圧回路で発生する油圧振動の解明と抑制

油圧回路（たとえば、自動車のオートマチックトランスミッションの構成要素の一部であるバルブボディなど）では、特定の条件下でバルブや圧力が振動する問題がしばしば生じる。その原因を解明し、抑制法に関して対策を確立する研究が行われている。具体的には、油路とバルブを対象として、相互の影響を考慮した油圧回路の一次元モデリングおよび動特性解析と三次元CFD解析とを組み合わせ、振動の要因解明を行う。すなわち油路およびバルブの三次元解析結果を一次元動特性解析へフィードバックすることで、一次元モデルの高精度化および最適化を行う。最終的には、これら一次元モデルより、油圧回路における振動要因の効率的な解明方法の確立を行っている。本研究室で実践される一次元モデル化手法はボンドグラフ法であり、数名の学生が専門に取り組んでいる。

3.2 油圧制御弁の振動問題の原因究明とその対策

油圧システム制御の要である油圧制御弁（スプール弁）の振動問題が多数報告されている。スプール弁の研究はこれまでに盛んに行われてきているが、スプールとスリーブのもつ μm オーダーの隙間まで含めたものはこれまでに行われていない。そのため、この隙間からの漏れが系に及ぼす影響やその効果などはいまだ不明である。そこで、 μm オーダーの隙間まで含めたスプール弁の振動問題の原因究明とその対策確立に勤しんでいる。目的達成へのアプローチは前記同様に、システムの動特性を把握するために一次元システムのモデル化と動特性解析、および形状や流れ場の変化を確認するために三次元数値流体解析を用いることで問題の解決に取り組んでいる。三次元解析では汎用数値流体解析コードを用いて、弁内流れを定常／非定常解析し、出力圧力や流量、流体力を実験結果・数値解析結果と比較することで、隙間を含めた数値解析結果の妥当性の検証を行っている。最近ではこの手法も随分確立されてきており、油振のメカニズムを明らかにするなど旺盛に研究活動を展開している。

4. 行 事

研究室では週に一度の研究会の他に毎年多数の行事が開催されている。春には花見を行い、新しく研究室に所属する学部生との交流を図り、新年度になり新体制になった研究室の新たなスタートが切られる。主に6月と12月に年二回の研究室旅行が行われ昨年度は大分の久住と鹿児島島の霧島に赴き、サッカー大会やバーベキュー、夜は鍋を食べながら飲み会をすることにより信頼関係の構築や交流を行っている。今年は6月に熊本の阿蘇に研究室旅行に行った。図3には今年度のゼミ旅行の集合写真を示す。今年度は女子学生が3人在籍しており、他研究室に比べ女子学生の数がとても多い。また秋には毎年他大学と合同でソフトボール大会を行っている。本研究室では一年を通して定期的に運動を行っているため、大会では毎年優勝候補の強豪チームである。昨年度は、本研究室のチームが大会で優勝を果たした。図4には昨年度のソフトボール大会の写真を示す。これらの活動を行うことにより、研究室には学年同士の強い繋がりの他に、学年を超えた研究室内の強い絆や団結力というもの生まれているのではないかと考える。また旅行や運動のみではなく、定期的に他大学の先生を招いて研究会を行ったり、他大学と合同で年に一度、数値解析に関する研究会として、九州北部ANSYS-CFXコンソーシアムを主催したりと向上心に溢れ、日々何かを吸収しようと貪欲

な研究室である。研究室の雰囲気は、メリハリがあり活気に溢れており、全員が熱意を持って自主的に研究に励んでいる。

5. 私の研究について

私たちの身の周りにはたくさんの渦が渦巻いていることを知っているだろうか？自動車や飛行機だけでなく、海や川、山などにも渦がある。その渦に関する問題は気象等だけではなく流体機械にも発生している。私はその渦と壁面の移動についての研究を行っている。壁面の近傍には小さな渦がたくさん密集しており、その渦によって機械や物体に働く力というものが決定される。この渦は効果的な力を生み出す役割と相対して、さまざまな問題を発生させる要因にもなっている。この両義的な役割を及ぼす渦と境界条件である壁面との関係を明らかにすることが私の研究である。本研究室では蝶の翅周りの渦構造について調べていると上記したが、羽ばたいている蝶のまわりには渦輪と呼ばれる渦の輪が発生していることを知っているだろうか。このような渦を私たちは普段見ることはできない。しかしながら、可視化を行うことにより渦を捉えることが可能になるのである。この渦をうまく利用することにより、蝶のように羽ばたく効率的なロボットを作ることが可能になるかもしれない。また壁面をうまく制御することにより私たち自身が空を飛べるようになる日もやってくるのではないだろうか。これは夢物語かもしれないが、大きな夢をもって研究により組むのは魅力的である。

6. 田中先生のこと

田中先生は、とてもパワフルで優しい先生である。昔はとても怖かったという話を伺うこともあるが、今ではそのような姿はめったに拝見することはない。先生は会議や講義等の学内の仕事以外に多数の学外の仕事も行っているため、忙しく研究室にいる時間も限られているが、研究室にいる時にはお忙しいにも関わらず私たちの時間を確保していただける。先生は研究に関する私たちの話に耳を傾けてくれるだけではなく、雑学を交えたさまざまなことについての大変興味深い話もしていただける。そのため、先生と話した後には心持も変化し、今後の日本を担う技術者としてより精進しなければならないと感じ、

より一層研究に真剣に向き合うようになる。また研究に関しても先生のお勧めの参考書や過去の文献を探してくださるなど献身的にサポートしてくださる。研究者としてだけでなく、人生の大先輩として大変魅力的な先生は、生徒から親しまれ、尊敬されている。このような先生のもとで研究を行えていることは大変な幸だと思っている。先生の良い点ばかり記述したのだが、このような場であるので仕方がないと感じていただきたい。



図3 集合写真



図4 ソフトボール大会

7. おわりに

本研究室のHPがありますので、興味を持った方はぜひ以下のURLにアクセスしてみてください。最近では研究室HPを手入していないことに気が付いたので、これを機会に再整備する予定である。

<http://tanakafutiwaki-lab.jp/>

(原稿受付：2014年8月4日)

企画行事

平成26年春季フルードパワーシステム講演会報告

著者紹介



かとうとも のり
加藤友規

福岡工業大学工学部知能機械工学科
〒811-0295 福岡県福岡市東区和白東3-30-1
E-mail: t-kato@fit.ac.jp

2007年東京工業大学大学院博士課程修了。都立高専助手～助教を経て、2010年福岡工業大学助教、2012年同大学准教授、現在に至る。空気圧制御に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）、技術士（機械部門）。

1. はじめに

本年5月29日（木）・30日（金）の2日間、機械振興会館本館（東京都港区芝公園3-5-8）において、平成26年春季フルードパワーシステム講演会が開催された。本講演会では、以下のとおり2種類のオーガナイズドセッション（OS）と製品技術紹介セッション、そして2種類の一般セッションが企画され、計49件の講演発表がなされた。

OS「機能性流体による融合化新展開」：10件
OS「フルードパワーのトライボロジー」：3件
製品技術紹介セッション：6件
一般セッション「油圧・水圧」：16件
一般セッション「空気圧」：14件

また、会期前日の5月28日（水）の午後には、春季講演会併設セミナーが同会場にて開催された。さらに、5月30日（金）午前には、特別講演が開催された。

本記事では、5月29日（木）・30日（金）の2日間の講演会について、概要を報告させていただく。

2. 各セッションの概要

2.1 OS：機能性流体による融合化新展開

本OSのオーガナイズは中野政身先生（東北大学）と吉田和弘先生（東京工業大学）であった。本OSの趣旨は、「ER流体、液晶、EHD・ECF、MR流体、磁性流体および機能性ソフトマテリアルなどは、電場や磁場などの外場に反応して流体の物理化学的性

質が変化する機能性流体である。これらの機能性流体の創製・評価、機能性流体を活用した特徴的な種々の機械要素・システム、そして機能性流体と油圧、空圧、電動などとの融合化によるフルードパワーシステムの新たな展開などに関する研究発表を募集し、機能性流体が拓く新たなフルードパワー関連技術の情報交換の場としたい。」ということであり、計2室で10件の発表がなされた。筆者の研究室の発表を含め、気液相変化アクチュエータに関する2件の発表も本セッションにて行われた（写真1）。



写真1 講演発表の様子（OS：機能性流体による融合化新展開）

2.2 OS：フルードパワーのトライボロジー

本OSのオーガナイズは小曾戸博氏（株式会社タカコ）と一柳隆義先生（防衛大学校）であった。本OSの趣旨は、「省エネルギーや環境問題が叫ばれる社会情勢下において、フルードパワー機器の高効率化や信頼性などを下支えするトライボロジー技術はますますその重要性が高くなっている。作動油や潤滑などフルードパワーのトライボロジーに関する分野や、その周辺技術についての講演を広く募集したい。」ということであり、3件の発表がなされた。

2.3 製品技術紹介セッション

本セッションは、企業から多数ご発表いただくことを目的とし、平成10年春季講演会から続いている企画である。本講演会では企画委員の成田晋氏

(KYB株式会社)が企画の取りまとめと座長をご担当され、企業からの発表4件と大学との共同開発事例1件、そして大学発ベンチャーの事例1件の計6件の発表がなされた。

2.4 一般セッション：油圧・水圧

一般セッション「油圧・水圧」では、計4室において16件の講演がなされた。筆者が講演論文集から判断する限り、14件が油圧に関する発表で、2件が水圧に関する発表であった(写真2)。



写真2 講演発表の様子（油圧・水圧）

2.5 一般セッション：空気圧

一般セッション「空気圧」では、計4室において14件の講演がなされた。なお、本セッションのうちの1部屋は29日(木)の午後に行われたが、会場手配の都合上、この部屋だけが本館地下1階の部屋になってしまったことは、主査として申し訳なく感じた。

3. 特別講演

5月30日(金)午前10時40分より約1時間、特別講演が行われた。講師は進士忠彦先生(東京工業大学精密工学研究所教授)で、演題は「磁気軸受を用いた使い捨て遠心血液ポンプシステムの開発」であった。また、講演概要は「補助循環や人工心肺に1ヶ月連続使用可能な使い捨てタイプの磁気浮上遠心血液ポンプを開発している。本講演では、羽根車の磁気浮上法、血液ポンプの生体適合性を含めた性能評価法、血液ポンプを構成する磁気軸受やモータを用いた流量推定法などを紹介する。」であった。なお、本特別講演は学会の社会貢献の一環として一般公開(入場無料)とされ、聴講者で会場はほぼ満



写真3 特別講演（東工大：進士忠彦 教授）

席となった(写真3)。

4. おわりに

5月30日(金)午後5時から総会に引き続き、技術懇談会が開催された。技術懇談会では開会に先立ち、平成25年秋季フルードパワーシステム講演会(神戸)の最優秀講演賞の授与が行われた(写真4)。



写真4 平成25年秋季講演会の最優秀講演賞の授与

その後、東工大の香川利春先生(旧会長)・上智大学の築地徹浩先生(新会長)のご挨拶により懇談会が開始され、最後は元会長で東工大名誉教授の中野和夫先生による一本締で閉会となった。

なお、筆者は本学会企画委員として、本講演会の主査を担当させていただいた。本講演会にご協力いただきました皆様に深く感謝申し上げます。

(原稿受付：2014年6月23日)

コーヒーブレイク

手押し消防ポンプ しゅくみ編

大 橋 彰

((一社) 日本フルードパワー工業会)

知りたかった消防ポンプの構造

前号¹⁾の井戸ポンプ・ファミリー編で紹介した押上ポンプ2個を対にしたものが消防ポンプである。図1は、前出の宇田川準一訳、物理学(1888, 明治21年)の表紙であり、そこでは救火唧筒(きゅうかそくとう)と称し、図2の断面図を掲載している²⁾。

日本では古くは龍吐水(竜吐水)と言い、新しくは腕用(わんよう)ポンプとも言われる。いわゆる消防用唧筒(消防用ポンプ)である。見たことがある方も多かろうし各地で保存されている。間断なく水を噴出させて消火効率が上がるよう、空気室を中央に備え、圧縮された空気の圧力を利用している。



図1 物理学表紙

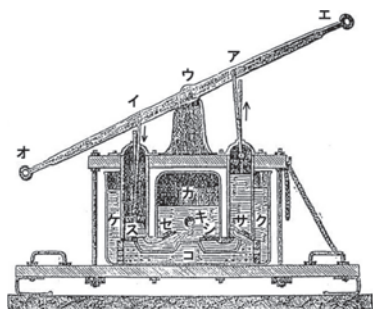


図2 救火唧筒

図3に島津製作所創業記念資料館で撮影した消火ポンプ模型を示す。理化学器械教材として販売され、外観図と販売価格を記載した目録(1937年)³⁾に¥20,000とある。企業物価指数の変遷から、現在の10万円くらいと推測される。図4はカットモデルの写真であり、資料館の館長からいただいた。これを見ると弁の位置などがよくわかる。



図3 消火ポンプ模型



図4 同カットモデル

救火唧筒の作動原理説明

Webに公開された物理学の全頁は、本文もかなり鮮明に読める¹⁾。わかる範囲で平仮名に直して紹介すると、図2の救火唧筒の説明は以下となる。

「この器械は壓上唧筒2個と氣室1個とを合成したる者にして、その製造及び用法は第153図を以て了解すべし。(ア)(イ)は活塞にして(ウ)軸のために自由に動くべき(エ)(オ)の槓杆に連結し交番上下すべきもの(カ)は氣室(キ)は噴水嘴を具うる枝管と連通する孔(ク)(ケ)(コ)は吸上管と連通する貯蓄処なり。かくて(ア)の活塞を抽退すれば(サ)の合頁を排してその上部に入る。この活塞を推進すれば(ケ)の合頁は水圧のために閉じるが故に水は(シ)の合頁を開きて氣室(カ)に入る。この時にあたり(イ)の活塞は上昇するを以て水は(ス)の合頁を開きその上部に入る。またこの活塞を推進すれば(ス)の合頁は閉じるを以て(セ)の合頁を排して氣室(カ)に入る。この如く2個の活塞、交番上下して止まざれば、水、常に浸入し氣常に圧縮せらし、その弾力強大にして水の噴進すること間断なし。蓋し精巧の器械にあっては水の噴出する百尺以上の高処に及ぶ者なり。」

明治時代の物理学書・補足

図1は洋書の翻訳・編集版である。この本の前に物理全志、全10冊(初版1878, 明治8年)があり、さらに辿ると、福沢諭吉、窮理図解、全3冊がある。図1はG.P. Quackenbos, Natural Philosophy (1870)が原典で、訳者の宇田川氏は群馬県師範学校の最初の物理学の先生とのこと。当時、器械を用いて物理を教えることを実践し、明治10年代に一種の理化実験指導書出版のブームが起きていたようだ⁴⁾。

参考文献

- 1) 大橋, 手押し井戸ポンプ・ファミリー編, フルードパワーシステム, Vol. 45 No. 5 (2014.9), p43
- 2) 宇田川, 物理学, 1888 (明治21), 近代デジタルライブラリー
- 3) 島津理化学器械目録500号 (1937)
- 4) 高橋浩, 『窮理図解』とNatural Philosophy, 群馬大学図書館報, No.287 (2002.12), 3-5

会 告

〈理事会・委員会日程〉

11月10日	委員長会議
11月13日	基盤強化委員会
11月25日	理事会
11月28日	編集委員会
12月5日	企画委員会
1月22日	情報システム委員会

〈第3回理事会〉

9月22日 15:00～17:00 機械振興会館
地下3階 B3—9号室（出席者15名）

- 1) 平成26年度フェロー認定推薦状況について
- 2) 第三回日中ジョイントワークショップ事業報告
- 3) 学会シンボルマークの登録について
- 4) フルードパワー道場9第2回開催案内
- 5) 国際シンポジウムの進捗について
- 6) 第10回国際シンポジウム実行委員長報告
- 7) 平成26年度学会賞選考委員長について
- 8) 会員の推移と入退会者について
- 9) IFPEX2014カレッジ研究コーナー報告
- 10) その他

〈委員会報告〉

第2回委員長会議

9月4日 15:00～17:00 機械振興会館
6階6—63号室（出席者7名）

- 1) 平成26年度フェロー認定者推薦状況について
- 2) 平成26年度学会賞選考委員長推薦について
- 3) 第三回日中ジョイントワークショップ事業報告
- 4) フルードパワー道場9第2回開催案内
- 5) 国際シンポジウムの進捗について
- 6) 第10回国際シンポジウム実行委員長報告
- 7) 学会事務局の情報機器の更新について
- 8) 学会の財務基盤の強化の進捗状況について
- 9) その他

第2回基盤強化委員会

9月9日 15:00～17:00 機械振興会館
地下3階 B3—9号室（出席者12名）

- 1) 会員サービス、会員数増加について
- 2) 外部への情報発信について
- 3) フルードパワー育成道場について
- 4) フルードパワー・バーチャルミュージアムについて
- 5) IFPEX2014の準備状況について

6) その他

第2回企画委員会

9月10日 15:00～17:00 機械振興会館
地下3階 B3—3号室（出席者18名）

- 1) 平成26年度実施の事業に関する報告・審議事項
 - ・ オータムセミナーについて
 - ・ ウィンターセミナーについて
 - ・ IFPEX2014学会主催講演会について
 - ・ 公益事業について
 - ・ その他

2) 平成27年度実施の事業に関する報告・審議事項

- ・ 春季講演会及び併設セミナーについて
- ・ 秋季講演会について
- ・ オータムセミナーについて
- ・ ウィンターセミナーについて
- ・ その他

3) その他審議・確認事項

- ・ 平成26年度オータムセミナー会告について
- ・ 平成26年度ウィンターセミナー会告について
- ・ WGの構成について
- ・ 企画委員会開催予定時期、審議事項及び次年度事業主査確定のタイミングについて
- ・ その他

第2回情報システム委員会

10月2日 16:00～17:30 法政大学市ヶ谷キャンパス、新見附校舎9階・創造空間サロン1（出席者7名）

- 1) 会議報告担当について
- 2) 会員管理システムの経過報告
- 3) 事務局情報機器の更新と購入について
- 4) HP更新作業状況について
- 5) 今後のHP更新作業について
- 6) 委員の増員について
- 7) その他

第3回編集委員会

10月3日 14:00～17:00 東京工業大学田町キャンパスキャンパスイノベーションセンター 7F—706会議室（出席者15名）

- 1) 学会誌発行報告
- 2) 学会誌編集計画について
 - ・ Vol.45 No.6「アディティブ・マニファクチャリング（積層造形／3Dプリンタ）」
 - ・ Vol.45 No.6小特集「日本フルードパワーシステム学会活動の紹介」
 - ・ Vol.46 No.1「IFPEX2014特集号」
 - ・ Vol.46 No.2「フルードパワーにおける故障予知技術

(案)」

・ Vol.46 No.3 「国際シンポジウム21014 (仮)」

3) その他

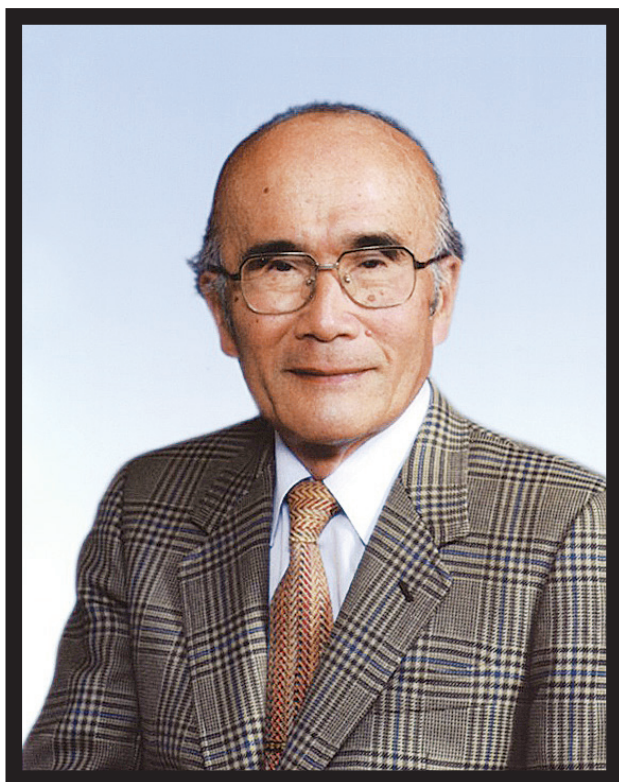
・ 会議報告

・ トピックスについて

・ Vol.46 No.4について

・ 原稿確認マニュアルについて

「名誉会員 市川常男氏の逝去を悼む」 (平成26年8月30日ご逝去)



ご略歴

1922年 2月27日生

1942年 浜松工業高等学校卒業

1945年 東京工業大学機械工学科卒業

1945年 東京工業大学研究助手

1946年 浜松工業専門学校講師

1949年 静岡大学講師

1951年 静岡大学助教授

1959年 静岡大学教授

1979年 豊橋技術科学大学教授

1980年 静岡大学名誉教授

1987年 佳木斯工学院顧問教授

1987年 愛知技術短期大学教授

1987年 豊橋技術科学大学名誉教授

1988年 華東理工大学名誉教授

1989年 大連鉄道学院顧問教授

1992年 愛知技術短期大学退職

1984年～1985年 (株)日本油空圧学会副会長

1985年～1988年 (株)日本油空圧学会会長

1989年 (株)日本油空圧学会名誉会員

本学会元会長 静岡大学名誉教授・豊橋技術科学大学名誉教授 市川常男先生は、病氣療養中のところ、去る8月30日92歳にてご逝去されました。

先生は1970年に本学会に入会され、各種委員会委員や委員長を歴任され、1984年度に副会長、1985年度から1987年度の3年間会長の要職を務められ、学会の発展に多大の功績を挙げられました。また、1989年には名誉会員に推挙されています。特に歯車ポンプの研究で広く知られ、研究成果をまとめた著書「歯車ポンプ」は同ポンプ設計技術者の必携の書として長く活用されてきました。さらに、1979年に、油圧に関する教科書的な著書「油圧工学」を日比昭先生と共著で執筆され、私は学生時代にその本で油圧の勉強をさせて頂き、現在も参考にさせて頂いています。これらの他にも、油空圧機器・要素の研究で多くの成果を挙げられました。

ここに市川常男先生の長年にわたる本学会に対する多大なご貢献に深く感謝申し上げるとともに、ご冥福を心からお祈り申し上げます。

会長 築地 徹浩 (上智大学)

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

2014年度 計算力学技術者（CAE技術者）資格認定事業（個体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者）

URL : <http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm>

主 催：一般社団法人機械学会

試験日程：上級アナリスト 2014年9月23日(火)、1・2級12月20日(土)

キャビテーションに関するシンポジウム

主 催：日本学会議 第三部（予定）

期 日：平成26年11月20日(木)、21日(金)

会 場：東京大学生産技術研究所（〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1）

No.14-105講習会「産業に役立つアクチュエータ研究開発の最前線」

主 催：一般社団法人日本機械学会（機素潤滑設計部門企画）

開 催：2014年12月4日(木)

会 場：名古屋大学ベンチャービジネスラバトリーベンチャーホール【名古屋市千種区不老町／電話(052) 789-5447／地下鉄名城線名古屋大学駅3番口より徒歩3分／<http://www.vbl.nagoya-u.ac.jp>】

第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会

主 催：公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門

開 催：平成26年12月14日(日)～17日(水)

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27 中央大学理工学部精密機械工学科

SI2014実行委員長 大隅 久 E-mail : osumi@mech.chuo-u.ac.jp

SICE事務局：部門協議会担当 E-mail : bumon@sice.or.jp TEL : 03-3814-4121

No.15-204「第6回機素潤滑設計生産国際会議 (ICMDT2015)」

主 催：一般社団法人日本機械学会（機素潤滑設計部門企画）

開 催：2015年4月22日(水)～25日(土)

会 場：沖縄コンベンションセンター（沖縄県）

問合せ先：〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦会館5階

一般社団法人日本機械学会 機素潤滑設計部門担当 高橋 綾

電話 (03) 5360-3504 FAX (03) 5360-3507 E-mail : a.takahashi@jsme.or.jp

会 告

会 員 移 動

会員の種類	正 会 員	海 外 会 員	学 生 会 員	賛 助 会 員
会 員 数 (10月10日現在)	941	15	124	136
差引き増減	- 2	0	- 3	+ 2

(注1) 正会員の内訳 名誉員13名・シニア員38名・ジュニア員159名

賛助会員

(株)曙ブレーキ中央技術研究所

(株)神崎高級工機製作所

正会員

熊谷 賢人 (日立建機株)

伊藤 貴廣 (株)日立製作所

兼述 秀樹 (株)神崎高級工機製作所

神川 伸久 (株)神崎高級工機製作所

吉田 尚仁 (株)ジェイテクト

平成26年度 ウインターセミナーのお知らせ
「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」
 開催日：平成27年3月2日(月) 午後13時～17時(予定)

開催趣旨：

様々な分野で液圧技術が活躍しております。昨年のウインターセミナーで大変好評であった「大型機械と油圧技術」の第二弾として、本セミナーにおいても、大型機械や大型施設で活躍する液圧技術の現状と今後の可能性について展望したいと思います。

開催日時：平成27年3月2日(月)
午後13時～17時(予定)

開催場所：機械振興会館
(東京都港区芝公園3-5-8)
詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。
皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

会 告

資料一覧表

価格は、(一社)日本フルードパワーシステム学会事務局までお問い合わせください。

資 料 名	発行年月
平成元年春季油空圧講演会講演論文集	元年 5月
平成元年秋季油空圧講演会講演論文集	元年11月
平成2年秋季油空圧講演会講演論文集	2年11月
平成3年秋季油空圧講演会講演論文集	3年11月
平成4年春季油空圧講演会講演論文集	4年 5月
平成4年秋季油空圧講演会講演論文集	4年10月
平成5年春季油空圧講演会講演論文集	5年 5月
平成5年秋季油空圧講演会講演論文集	5年11月
平成6年秋季油空圧講演会講演論文集	6年10月
平成7年秋季油空圧講演会講演論文集	7年11月
平成8年春季油空圧講演会講演論文集	8年 5月
平成8年秋季油空圧講演会講演論文集	8年10月
平成9年春季油空圧講演会講演論文集	9年 5月
平成10年春季油空圧講演会講演論文集	10年 5月
平成10年秋季油空圧講演会講演論文集	10年11月
平成12年秋季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	12年10月
平成13年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	13年 5月
平成13年秋季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	13年11月
平成14年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	14年 5月
平成15年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	15年 5月
平成16年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	16年 5月
平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	16年11月
平成17年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	17年 5月
平成18年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	18年 5月
平成18年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	18年11月
平成19年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	19年 5月
平成19年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	19年11月
平成20年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	20年 5月
平成21年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	21年 6月
平成21年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	21年11月
平成22年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	22年 5月
平成22年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	22年12月
平成23年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	23年 5月
平成24年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	24年 5月
平成11年IFPEXフルイドパワーシステムワークショップ講演会講演論文集	11年10月
平成14年IFPEXフルイドパワーシステムワークショップ講演会講演論文集	14年 6月

平成17年IFPEXフルードパワーシステムワークショップ講演会講演論文集	17年 8月
平成20年IFPEXフルードパワーシステムワークショップ講演会講演論文集	17年 4月
平成23年IFPEXフルードパワーシステムワークショップ国際見本市論文集	23年 7月
平成26年第24回IFPEXカレッジ研究発表展示コーナー論文集	26年 9月
フォーラム'91「賢い電子油圧制御をいかに実現するか」	3年 7月
フォーラム'92「ここまできた電子油空圧制御システム」	4年 7月
フォーラム'94「油空圧駆動と電動駆動の現状と課題 その1」	6年 7月
フォーラム'95「油空圧駆動と電動駆動の現状と課題 その2」	7年 7月
フォーラム'96「油空圧技術を支えるトライボロジー」	8年 7月
フォーラム'97「21世紀を見つめた新技術開発」	9年 7月
フォーラム'98「オフロードビーグル用走行装置の動向」	10年 7月
フォーラム'99「技術開発におけるトラブル事例」	11年 7月
フォーラム2000「油空圧機器の省エネルギー化はこれだ！」	12年 7月
フォーラム2001「自動車における最新油空圧技術の動向」	13年 7月
フォーラム2002「電動かフルードか」	14年 8月
フォーラム2003「電動かフルードかⅡ」	15年 5月
フォーラム2003「最近の緩衝・制振・免振技術」	16年 5月
オートムセミナー「油空圧のセンシング技術」	元年10月
オートムセミナー「メカトロニクス関連センサ」	2年10月
オートムセミナー「油空圧を支える解析技術」	4年10月
オートムセミナー「油圧機器・システムにおける振動をいかに克服するか」	5年10月
オートムセミナー「油空圧制御と高速インターフェース技術の融合」	6年11月
オートムセミナー「油空圧におけるシミュレーション技術の現状と課題」	7年10月
オートムセミナー「最新制御理論の超活用法（油空圧システムとロバスト制御の融合）」	8年 9月
オートムセミナー 2000「環境適合技術の動向」	12年 9月
オートムセミナー 2001「フルードパワーシステムに用いられる制御技術の動向」	13年 9月
オートムセミナー 2003「フルードパワーと環境・リサイクル」	15年10月
オートムセミナー 2004「食品機械におけるフルードパワーの利用と課題」	16年10月
オートムセミナー 2005「レスキューにおけるフルードパワーシステム」	17年10月
オートムセミナー 2006「生活に密着したフルードパワー」	18年10月
オートムセミナー 2007「鉄道におけるフルードパワー技術」資料は『油空圧技術』Vol. 49 No. 4	
オートムセミナー 2008「フルードパワーシステムと環境・省エネルギー」	20年10月
オートムセミナー 2009「フルードパワーシステムのためのlinux開催環境」	21年10月
オートムセミナー 2010「BOPビジネスの可能性～CSRとビジネスの両立～」	22年11月
オートムセミナー 2011「パワートレインにおけるフルードパワー技術」	23年11月
ウインターセミナー「油空圧システムの低騒音化のために」	2年 2月
ウインターセミナー「知っておきたい新しいアクチュエータ」	3年 2月
ウインターセミナー「200X年における電子油空圧はどうあるべきかPart2」	4年 2月
ウインターセミナー「新素材の油空圧への応用」	5年 2月
ウインターセミナー「空気圧の新たな可能性を求めて」	6年 2月
ウインターセミナー「人と環境に優しい油空圧—油空圧機器・システムの低騒音化技術—」	7年 2月
ウインターセミナー「油圧システムの高圧化に関する現状と将来」	8年 2月
ウインターセミナー「フルードパワーにおける流体の役割」	9年 2月
ウインターセミナー「ER流体の可能性とその油空圧技術への応用」	10年 1月
ウインターセミナー「ユーザは語る・自動化機器における駆動方式の現状と将来像」	11年 1月
ウインターセミナー「水圧システムの現状と応用事例・展望」	12年 1月
ウインターセミナー「省エネ、環境のためのセンシング」	13年 1月
ウインターセミナー「油空圧機器・システムにおける省エネルギー化の方法」	14年 1月

ウインターセミナー「油空圧機器に係わる加工技術～共存する油空圧機器と加工技術～」	15年 1月
ウインターセミナー「メンテナンスエンジニアリングーランニングコストを安く～」	16年 1月
ウインターセミナー「医療・福祉におけるフルードパワーシステムの応用動向」	17年 1月
ウインターセミナー「機械システムの安全性」	18年 2月
ウインターセミナー「家庭の中のフルードパワー」	19年 2月
ウインターセミナー「航空機とロケットへの応用」	20年 2月
ウインターセミナー「海と船のフルードパワー」資料は『学会誌』Vol. 39 No. 5	21年 2月
ウインターセミナー「フルードパワー機器・システムの小型化」資料は『学会誌』Vol. 39 No. 5	22年 2月
ウインターセミナー「福祉・医療環境における空気圧応用の現状と問題」	23年 2月
ウインターセミナー「圧縮空気エネルギーの有効利用技術」	24年 2月
ウインターセミナー「アクアドライブシステム（新水駆動圧技術）の現状と将来」	25年 2月
教育講座「マイコン制御講座」（大学上級コース）	元年 8月
教育講座「現代制御理論講座」（大学上級コース）	元年10月
教育講座「マイコン制御講座」（大学上級コース）	2年 8月
教育講座「トライボロジー講座」（大学上級コース）	3年 8月
教育講座「油空圧における鋳造技術講座」	5年10月
教育講座「空気圧システム入門」	10年 9月
教育講座「空気圧システム入門」	11年 6月
教育講座「空気圧システム入門」	13年 6月
教育講座「トライボロジー講座」	14年 9月
教育講座「空気圧システム入門」	15年 5月
教育講座「空気圧システムの基礎」	15年 5月
第1回油空圧国際シンポジウム論文集	2年 1月
第2回油空圧国際シンポジウム論文集	5年 9月
第3回油空圧国際シンポジウム論文集	8年11月
第4回油空圧国際シンポジウム論文集	11年11月
第5回油空圧国際シンポジウム論文集	14年11月
第6回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（CD-ROM）	17年11月
第7回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	20年 9月
第8回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	23年 9月
学会創立20周年記念出版「油空圧の進歩100人の証言」	2年 5月
学会創立30周年記念出版「アドバンスドフルードパワー技術の基礎と応用」	15年 4月
分冊販売 油圧駆動の世界—油圧ならこうする—	
空気圧システム入門	
水圧駆動テキストブック	
日本フルードパワーシステム学会創立40周年出版	23年4月
分冊販売 油圧システムのモデリングと解析手法	
Webシミュレーション解説	
アクアドライブ技術の進展	

フルードパワーシステム 総目次 (第45巻)

	号	通し頁		号	通し頁
【挨拶】					
新年の挨拶	…香川 利春	1 4	特集「フルードパワーにおける最新の計測技術」		
年頭にあたって	… $\left\{ \begin{array}{l} \text{築地 徹浩} \\ \text{肥田 一雄} \\ \text{北畠 多門} \end{array} \right.$	1 5	「フルードパワーにおける最新の計測技術」発行にあたって	…柳田 秀記	5 206
会長就任にあたって	…築地 徹浩	4 150	AEセンサを用いた液体流量計測法	… $\left\{ \begin{array}{l} \text{中田 毅} \\ \text{鄭 以勤} \\ \text{桜井 康雄} \end{array} \right.$	5 207
副会長新任のご挨拶	…小山 紀	4 151	カルマンフィルタを用いた管内非定常流量計測	…眞田 一志	5 211
【解説】					
特集「フルードパワーを活用した移動ロボットの最前線」					
「フルードパワーを活用した移動ロボットの最前線」発行にあたって	…塚越 秀行	1 7	マイクログPIV (Particle Image Velocimetry)	…西野 耕一	5 214
空圧駆動によるヒューマノイド	…細田 耕	1 8	感圧塗料による圧力計測技術の機械工学への応用	…森 英男	5 217
高速かつ柔軟な油圧式2足歩行ロボット	…玄 相昊	1 12	超音波法による潤滑診断の可能性	…竹内 彰敏	5 220
バブラアクチュエータの開発と内視鏡誘導への応用	… $\left\{ \begin{array}{l} \text{鈴森 康一} \\ \text{脇元 修一} \end{array} \right.$	1 16	音源分離技術	…戸上 真人	5 224
電界共役流体を用いた小型壁面移動ロボット	…竹村研治郎	1 20	特集「アディティブ・マニファクチャリング」		
柔軟袋状構造を利用した流体駆動型クローラ機構	… $\left\{ \begin{array}{l} \text{木村 仁} \\ \text{片岡木太郎} \\ \text{伊能 教夫} \end{array} \right.$	1 24	「アディティブ・マニファクチャリング」の発行にあたって	…吉満 俊拓	6 256
先端成長動作による狭隘地形内の無摺動移動探索ロボット	…塚越 秀行	1 28	積層造形技術	…徳永 剛	6 257
特集「フルードパワーに貢献する材料、加工、表面処理技術」					
「フルードパワーに貢献する材料、加工、表面処理技術」発行にあたって	…武田 稔	2 54	ファブラボの活動とその広がり	…門田 和雄	6 262
電子機器用の難燃ポリ乳酸複合材の開発	… $\left\{ \begin{array}{l} \text{木内 幸浩} \\ \text{位地 正年} \end{array} \right.$	2 55	3Dプリンティングを活用した実習系授業の取り組み	…松本 大樹	6 265
DLC-Si被覆電磁クラッチを用いた次世代電子制御AWDカップリングの開発	…安藤 寛之	2 59	中小企業における3Dプリンタ活用の可能性	…福岡新五郎	6 268
水圧システムに貢献する電磁材料	…山田 裕樹	2 64	RP成型機によるシュル鋳型の短納期製作について	…高橋 啓二	6 273
電磁軟鉄バリレス加工技術の構築	… $\left\{ \begin{array}{l} \text{窪田 朝徳} \\ \text{李 和樹} \end{array} \right.$	2 67	【ニュース】		
油圧ポンプ・モータに貢献する摺動部品材料と表面処理技術	…西田 信治	2 70	日中若手研究者交流事業	…伊藤 和寿	3 123
特集「エアコンプレッサの最新技術」					
「エアコンプレッサの最新技術」発行にあたって	…藤田 壽憲	3 104	インドにおける国際交流	…香川 利春	4 173
エアコンプレッサの省エネルギー	…北崎 建生	3 105	ミャンマーにおける国際交流 (ICSE2013参加記とヤンゴン最新事情)	…香川 利春	4 175
小型水車を用いたエアレーション装置の開発	…日吉 健二	3 107	International Journal of Fluid Power 電子ジャーナルの紹介	…眞田 一志	5 228
小型エアポンプによる生産工場の省エネ	…竹脇 邦幸	3 110	【会議報告】		
最適コンプレッサ運転制御と減圧制御	…赤堀 好昭	3 113	日本機械学会2013年度年次大会におけるフルードパワー技術研究第13回「運動と振動の制御」シンポジウム (MOVIC2013) 報告	…脇元 修一	1 32
水噴射式スクリュコンプレッサ	…日比野 真	3 117	ASME/BATH FPMC2013会議におけるフルードパワー技術研究動向	…村山 栄治	1 34
オイルフリーブースタ圧縮機	…鈴木 達也	3 120	ICH2013におけるフルードパワー技術研究動向	…田中 豊	2 74
特集「これがフルードパワーの魅力だ！」					
「これがフルードパワーの魅力だ！」特集号発刊にあたり	…田中 豊	4 152	山梨講演会2013におけるフルードパワー技術研究動向	…坂間 清子	2 76
油圧分野の最新動向と特徴的な事例紹介	…眞田 一志	4 153	計測自動制御学会 流体計測制御シンポジウムに観るフルードパワー研究動向	…川上 幸男	2 78
空気圧サーボシステムのロボットへの展開	…川嶋 健嗣	4 158	ICMT2013におけるフルードパワー技術研究動向	…藤田 壽憲	2 80
ここまで来た水圧システム	…伊藤 和寿	4 163	FLUCOME2013奈良開催報告	… $\left\{ \begin{array}{l} \text{香川 利春} \\ \text{菅野 貴皓} \end{array} \right.$	3 127
機能性流体の応用例：次世代フルードパワーシステムを目指して	…吉田 和弘	4 168	IFPE2014におけるフルードパワー技術研究動向	…田中 豊	4 178
			IFK2014 (ドイツ・アーヘン) 参加記	…加藤 友規	5 229
			JSME機素潤滑設計部門講演会におけるフルードパワー技術研究	…金 俊完	5 231
			ROBOMECH2014におけるフルードパワー技術研究動向	…早川 恭弘	6 276
			ACTUATOR14におけるフルードパワー技術研究	…吉田 和弘	6 278

FPNI 第8回 Ph.Dシンポジウムにおけるフルードパワー技術の研究動向	柳 隆義	6	280	触れて学べる! 入門者向き実習講座「油空圧技術」	1	47
【教室 (連載)】				共催・協賛行事のお知らせ	1	47
入門講座「トライボロジー」第1回: 摩擦について	風間 俊治	4	181	平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーに貢献する材料, 加工, 表面処理技術」のお知らせ	1	48
入門講座「トライボロジー」第2回: 表面について	風間 俊治	5	233	平成26年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	1	48
入門講座「トライボロジー」第3回: 摩擦について	風間 俊治	6	282	平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」のお知らせ	1	48
【トピックス】				その他	1	35, 46, 49, 50
ISO/TC131/SC9/WG1 ISO4413の改正	渋谷 文昭	1	36	フルードパワー道場9「モデルベース開発の事例」開催のお知らせ	2	79
JIS B 8370:2000 空気圧システム通則の改正	張 護平	2	84	共催・協賛行事のお知らせ	2	98
特許文献を調べる・特許電子図書館の活用3…日本の分類・テーマコード1	木原 和幸	2	81	平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーに貢献する材料, 加工, 表面処理技術」のお知らせ	2	99
特許文献を調べる・特許電子図書館の活用4…日本の分類・テーマコード2	木原 和幸	4	184	日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会共催 平成26年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	2	99
特許文献を調べる・特許電子図書館の活用5…類似文献の検索1	木原 和幸	6	285	平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」のお知らせ	2	99
タイ駐在員日記	栗田 敏行	1	39	触れて学べる! 入門者向き実習講座「油空圧技術」空気圧システム制御の実務 (M1301)	2	99
アメリカ赴任生活	黒尾 賢治	2	87	その他	2	63, 97, 100
タイ駐在日記	重本 陽一	3	131	平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーに貢献する材料, 加工, 表面処理技術」のお知らせ	3	140
ブラジル滞在日記	寺崎 敦	4	187	日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会共催 平成26年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	3	140
中国駐在員日記	住野 亘	5	236	平成26年春季フルードパワーシステム講演会 特別講演のお知らせ	3	140
英国駐在記	山田 宏昭	6	288	平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」のお知らせ	3	140
【研究室紹介】				平成26年度特別教育講座「油圧システムのモデリングの基礎をつかむ」のお知らせ	3	141
東京工業大学 香川・只野研究室紹介	金 寅 矢島 拓実	1	42	会員情報の確認と更新のお願い	3	141
山梨大学工学部情報メカトロニクス工学科油空圧制御研究室	大内 英俊	2	90	共催・協賛行事のお知らせ	3	144, 145
富山高等専門学校 電気制御システム工学科 西田研究室	西田 均 武田健太郎	3	134	その他	3	139, 142, 143, 146
上智大学築地研究室	濱田溪太郎	4	190	第33期 通常総会終了	4	197
奈良高専電子制御工学科早川研究室	早川 恭弘	5	239	平成26年度受賞候補者募集	4	198
九州工業大学 田中・瀧脇・清水研究室	嶋田 愛子	6	291	フェロー認定者推薦のお願い	4	199
【随想】				第9回JFPS国際シンポジウム開催のお知らせ	4	199
若いフルードパワー技術者に送る老いた電気屋フルードパワーファンの妄言	野見山紘一	1	44	共催・協賛行事のお知らせ	4	200
【企画行事】				その他	4	177, 196, 202
平成26年度企画行事紹介	大内 俊英 桜井 康雄	2	93	第9回JFPS国際シンポジウム開催のお知らせ	5	210
平成25年度オートムセミナー開催報告「鉄道車両とフルードパワー技術」	風戸 昭人	2	95	日本フルードパワーシステム学会平成26年度受賞候補者募集	5	247
平成25年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告	竹村研治郎	3	137	平成26年度オートムセミナーのお知らせ	5	248
平成25年度ウインターセミナー開催報告「大型機械と油圧技術」	林 光昭	4	193	共催・協賛行事のお知らせ	5	249
平成26年春季講演会併設セミナー開催報告「フルードパワーに貢献する材料, 加工, 表面処理技術」	武田 稔	5	242	その他	5	246, 250, 251, 252
平成26年春季フルードパワーシステム講演会報告	加藤 友規	6	294	共催・協賛行事のお知らせ	6	299
【コーヒープレイク】				平成26年度ウインターセミナーのお知らせ「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」	6	300
手押し井戸ポンプ ルーツ編	大橋 彰	4	195	資料一覧	6	301
手押し井戸ポンプ ファミリー編	大橋 彰	5	245	フルードパワーシステム第45巻総目次	6	304
手押し消防ポンプ しくみ編	大橋 彰	6	296	その他	6	297, 298, 300, 306
【会告】						
平成25年度 ウインターセミナーのお知らせ「大型機械と油圧技術」		1	47			

編集室

次号予告

—特集「IFPEX2014」—

〔挨拶〕 年頭のご挨拶		築地 徹浩
年頭にあたって	小山 紀	肥田 一雄
〔巻頭言〕「IFPEX2014」発行にあたって		吉満 俊拓
〔解説〕 IFPEX2014における空気圧分野の技術動向		加藤 友規
IFPEX2014における油圧分野の技術動向		佐藤 恭一
IFPEX2014における水圧分野の技術動向		鈴木 健児
IFPEX2014空気圧セミナー		小山 紀
IFPEX2014油圧セミナー「油圧の魅力とその可能性に迫る」		田中 豊
IFPEX2014見学記（カレッジ研究発表コーナ）		吉満 俊拓
〔ニュース〕 第三回日中ジョイントワークショップおよび日中若手研究者交流報告	加藤 友規	伊藤 和寿
〔会議報告〕 MOVIC2014におけるフルードパワー技術研究動向		眞田 一志
機械学会2014年度年次大会におけるフルードパワー技術研究動向		藤田 壽憲
FPMC2013におけるフルードパワー技術研究動向		金 俊完
〔教室〕 入門講座「トライボロジー」 第4回：潤滑について		風間 俊治
〔トピックス〕 フルードパワー人材育成への産学連携		佐藤 恭一
〔研究室紹介〕 防衛大学校 機械システム工学科 流体システム講座	西海 孝夫, 一柳 隆義	栗林 哲也
〔コーヒーブレイク〕 ブラマー氏の水圧機 はじめての水圧編		大橋 彰

平成26年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 吉田 和弘 (東京工業大学)	委員 中野 政身 (東北大学)
副委員長 塚越 秀行 (東京工業大学)	成田 晋 (KYB株)
委員 伊藤 雅則 (東京海洋大学)	藤田 壽憲 (東京電機大学)
内堀 晃彦 (宇部工業高等専門学校)	丸田 和弘 (株コマツ)
小倉 弘 (日立建機株)	村松 久巳 (沼津工業高等専門学校)
加藤 猛美 (株コガネイ)	柳田 秀記 (豊橋技術科学大学)
加藤 友規 (福岡工業大学)	山田 真の介 (株TAIYO)
北村 剛 (油研工業株)	吉満 俊拓 (神奈川工科大学)
木原 和幸 (財工業所有権協力センター)	担当理事 伊藤 和巳 (KYB株)
栗林 直樹 (川崎重工業)	山田 宏尚 (岐阜大学)
五嶋 裕之 (機械振興協会)	編集事務局 藤谷 秀次 (学会事務局)
佐藤 恭一 (横浜国立大学)	竹内 留美 (勝美印刷株)
妹尾 満 (SMC株)	
多田 昌弘 (CKD株)	(あいうえお 順)

会告

複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写してください。ただし(公社)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。したがって、社外頒布用の複写は許諾が必要です。

権利委託先：(一社) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL : 03-3475-5618 FAX : 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接本会へご連絡ください。

日本フルードパワーシステム学会論文集

第45巻, 第6号 (2014)

平成26年11月

目 次

研究論文

1. 水道水圧駆動マッキベン型人工筋の変位制御
(第1報, 人工筋のモデル化およびBouc-Wenモデルの適用)
小林 亘, 伊藤 和寿 85
2. 油圧回路におけるポペット弁の振動現象
(弁振動とキャビテーション現象の関連性)
熊谷 賢人, 龍 小平, 太田 匡則,
前野 一夫, 鄒 俊 94

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.45, No.6

November 2014

Contents

Paper

1. Displacement Control of Water Hydraulic McKibben Muscle
(1st Report: Modeling of a Muscle and Application of Bouc-Wen Model)
Wataru KOBAYASHI, Kazuhisa ITO 85
2. Vibration Phenomenon of Poppet Valve in Hydraulic System
(Relationship between Poppet Valve Vibration and Cavitation Phenomenon)
Kento KUMAGAI, Shohei RYU, Masanori OTA,
Kazuo MAENO, Jun ZOU 94

Published by
The Japan Fluid Power System Society
c/o Kikaishinko Building
3-5-22 Shiba-koen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011, Japan

研究論文

水道水圧駆動マッキベン型人工筋の変位制御*
(第1報、人工筋のモデル化およびBouc-Wenモデルの適用)

小林 亘**, 伊藤 和寿**

Displacement Control of Water Hydraulic McKibben Muscle
(1st Report : Modeling of a Muscle and Application of Bouc-Wen Model)

Wataru KOBAYASHI, Kazuhisa ITO

This paper is concerned with modeling of water hydraulic McKibben muscle. In particular, linear system identification technique is applied to the muscle in order to obtain a muscle dynamic model. However, the muscle has nonlinearity such as hysteresis and saturation characteristics. It is difficult to express the nonlinearity using linear system identification because the linear model is assumed. Then we propose the introduction of Bouc-Wen model which is widely used for expression of hysteresis characteristics for the identified muscle model. The application of Bouc-Wen model is easy because of the structure of the identified model and the proposed muscle model has good agreement with experimental results. In addition, the model for gait-training taking into consideration of its operation range can be obtained. Applying to limited operation range, the performance of the identified muscle model is improved and then the model which can express hysteresis and saturation characteristics can be obtained.

Key words : Water hydraulics, McKibben muscle, Modeling, Bouc-Wen model, System identification

1. 緒 言

マッキベン型人工筋は、高い柔軟性と高パワー密度を有するアクチュエータとして医療・福祉分野を中心に広く使用されてきた¹⁾。とりわけ取り扱いの容易さから、圧縮空気を使用する空気圧駆動のものが多く用いられている。しかしながら制御系設計の観点からは、人工筋の強い非線形性や空気の圧縮性など無視できない不確かさが原因となり、高い制御性能を発揮することは困難であった。加えて、人工筋を構成するインナーチューブとそれを覆うナイロン製スリーブの経年劣化による人工筋の収縮特性の変化も、制御性能に大きく影響する。実際にはPID制御のような比較的単純な制御系が適用されることが多い反面、十分な制御性能が得られておらず、モデルベースでの制御系設計が注目されつつある。しかし、これまでのモデルベースでの制御系設計に用いられてきた、人工筋が本来持つ強い非線形性をある条件下で線形化した近似モデルは、人工筋の適用範囲を狭めてしまう恐れがある。このような背景から、線形近似されたモデルではなく、かつ制御系設計に容易に用いることのできる新しい人工筋の数学モデルが求められて

いる。

本研究では、リハビリテーションにおける歩行訓練に注目し、効果が大きいとされる水中歩行訓練を対象とした、クリーン性に優れ小型で容易に着脱可能な歩行訓練補助装具について検討してきた²⁾。水中での使用を考慮し、提案装具には水圧で駆動するマッキベン型人工筋を用いている。水圧駆動マッキベン型人工筋は、空気圧駆動では困難な高圧力域を対象としたもの³⁾と水道水圧などの低圧力域を対象としたものに分けられる⁴⁾。特に、空気圧と同等な圧力域である水道水圧を用いることにより、駆動源となるポンプを必要とせず、かつ空気圧と同等な収縮特性が得られるため、水道水圧駆動マッキベン型人工筋はよりリハビリに適したアクチュエータであるといえる。なお、本論文では水道水圧駆動マッキベン型人工筋の変位制御に着目し、モデルベース制御の公称モデルとして用いる人工筋の数学モデルの導出について述べる。

著者らはこれまでに、水道水圧駆動マッキベン型人工筋の特性解析、変位センサを用いない人工筋変位推定手法について報告してきた^{5), 6)}。後者のうち流量計を用いた変位推定法では、非圧縮性流体である水を作動流体として用いることで容易かつ高精度に人工筋変位を推定可能であることを示した。しかしながら、提案した推定法は流量計単体の性能に強く依存しており、かつ供給流量の積算値を用いて推定を行う必要があるため、頻繁に伸縮を繰り返すような動作においては十分な精度を得ることが難しく、長時間

*平成26年4月28日 原稿受付

**芝浦工業大学大学院理工学研究科

(所在地：埼玉県さいたま市見沼区深作307)

(E-mail : nb12102@shibaura-it.ac.jp)

の使用が想定されるような対象への適用は困難であった。そこで、本論文では供給圧力—人工筋変位特性をシステム同定により伝達関数モデルとして記述する手法について述べる。加えて、供給圧力—人工筋変位特性を明らかにすることで、制御用モデルとしてだけでなく、ヒステリシス解析にも使用可能なモデルを構築する。具体的には、人工筋が有する強いヒステリシス特性を記述するため、Bouc-Wenモデルと呼ばれるヒステリシスモデルを組み合わせた人工筋モデルについて提案する。なお、Bouc-Wenモデルの人工筋への適用は、その有用性が示されており⁷⁾、従来提案されてきた人工筋モデルと比較して容易にパラメータを同定できるという特長を有している。しかしながら、負荷に関する考察は十分になされておらず、有負荷時のモデルの妥当性について検証する必要がある。本論文では、一定負荷を与えた際の提案モデルの再現性を確認することも目的の一つとする。なお、本論文では水圧人工筋を対象としているが、圧力—収縮率特性がほぼ同等である空気圧人工筋に対しても提案モデルを同様に適用することができる。

2. 主な記号

- D : 人工筋径
 L : 人工筋長
 b : スリーブのスレッド長
 $l(k)$: 人工筋変位
 n : スレッドの巻き数
 $p(k)$: 供給圧力
 $y(k)$: 仮想ヒステリシス変数
 γ : スリーブの編み角

3. システム同定による人工筋のモデル化

空気圧駆動マッキベン型人工筋は、人工筋が外部になす仕事に基づくモデル⁸⁾や慣性および粘性負荷を考慮した運動方程式に基づくモデル⁹⁾など様々な数学モデルが提案されている。提案されたモデルの中には、非常に高い再現性を持つものも存在する一方、人工筋を構成するインナーチューブとそれを覆う外側のナイロン製スリーブの変形やねじれ、これらにより発生する摩擦力や曲げモーメントを考慮する必要がある¹⁰⁾、人工筋の変位制御という観点からは必要となる物理パラメータが多く、十分な実用性を伴うものが少ない。さらに、実際にはPID制御のような比較的単純な制御則が適用されることが多く、人工筋が持つ強い非線形性を十分に補償できる制御則は用いられていない。これらが原因となり、マッキベン型人工筋はアクチュエータそのものの取り扱いが容易である一方で、制御性能がそれほど高くないアクチュエータであるという認識が一般的となってしまう。近年では、人工筋を適用したシステムに対して高い制御性能を要求する傾向にあり、人工筋の性能改善が求められている。以下では、モデルベース

ト制御に用いる公称モデルとして、線形システム同定の手法を用い、同定実験により得られた入出力データのみに基づいた数学モデルを導出する。従来の人工筋モデルでは物理パラメータの計測を必要としていたが、一度の同定実験のみでモデルを導出できるシステム同定はより容易なモデル導出法である。Fig. 1, 2にそれぞれシステム同定実験に用いた実験装置、人工筋の幾何学的構造、Table 1に実験に用いた人工筋の各物理パラメータを示す。なお、実験装置は電磁切替弁、人工筋上流側に接続された圧力センサ、人工筋下端部に接続されたリニアポテンシオメータから構成され、供給源には一般水道を用いている。実験に用いた人工筋は空気圧駆動を想定したものであるが、特性解析実験により水道水圧で駆動した際にも空気圧とほぼ同等な特性が得られることが明らかとなっている¹¹⁾。

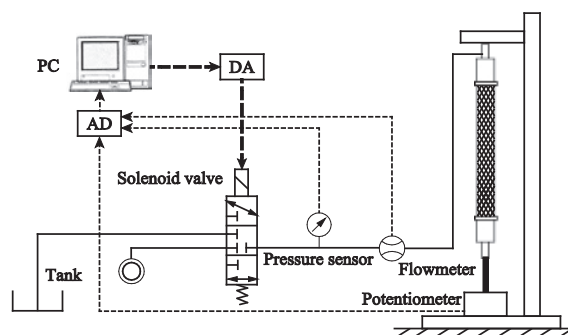


Fig. 1 Experimental setup for system identification

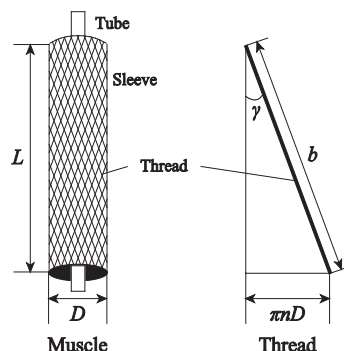


Fig. 2 Geometry of muscle and thread

Table 1 Parameters of McKibben muscle

Parameters	Value	Unit
Natural length L_0	540	mm
Thread length b	594	mm
Turns of a thread n	54	(•)

本研究では、システム同定に用いるモデルとして広く用いられているARXモデルを採用した。人工筋に加わる負荷張力は人工筋下端部に接続されたポテンシオメータが発揮する64Nであり、無負荷時における駆動条件とほぼ等しい。人工筋が十分に伸張するまでには比較的長い時間を要する

ため、収縮時および伸長時の動特性を十分に再現できる入力を電磁切替弁に印加している。なお、Fig. 3は同定実験により得られた入出力データである。

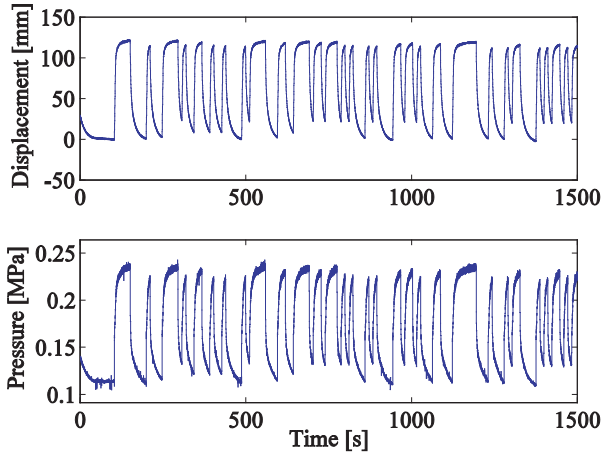


Fig. 3 Input (pressure) and output (displacement) data

以下にシステム同定実験により得られた入出力データを基に同定した人工筋モデルを示す。

$$G_w(z) = \frac{Z[l(k)]}{Z[p(k)]} = \frac{67.22}{z - 0.9356} \quad (1)$$

このとき、入力 $p(k)$ 、出力 $l(k)$ はそれぞれ人工筋への供給圧力および人工筋変位であり、サンプリング時間は0.1sである。ただし、同定用入出力データの生成に用いたサンプリング時間は12sであり、人工筋モデルを導出する際にサンプリング時間を再設定している点に注意が必要である。本来、入力は電磁弁への印加電圧が選ばれるが、供給圧力と人工筋変位の相関が高く、比較的単純な構造で同定可能であることが想定されるため、供給圧力を入力としてモデル化を行っている。また、人工筋の特性解析において供給圧力—人工筋変位特性を明らかにすることは重要であり、この特性を人工筋モデルにより再現することが求められる。なお、供給圧力と人工筋変位の高い相関は、非圧縮性流体である水の高い体積弾性率に起因するものと考えられる。

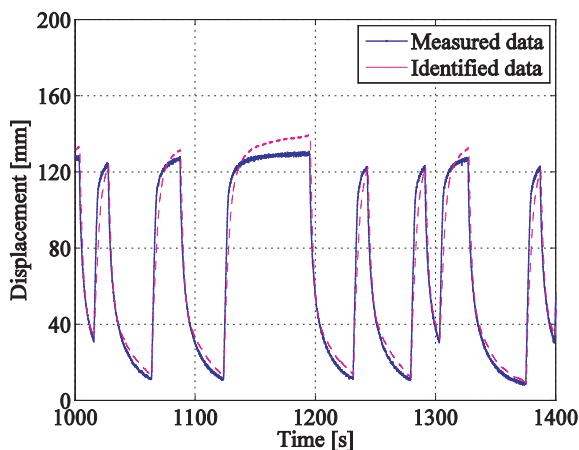


Fig. 4 Comparison of measured and identified data

Fig. 4に変位センサにより計測された人工筋変位の実測値と実験と同様の入力を与えた際の人工筋モデルのシミュレーション値を比較した結果を示す。同定により得られた人工筋モデルは過渡応答を十分に再現できているものの、収縮時における定常応答に誤差が生じている。このように、スレッド—スリーブ間およびスレッド同士間に発生する摩擦などに起因する伸長時と収縮時における応答が大きく異なる人工筋の特性を、線形システム同定のみで再現することは難しい。

4. Bouc-Wenヒステリシスモデル

一般にマッキベン型人工筋のヒステリシスはFig. 5で示すような特性であることが知られており、ヒステリシスを考慮することなく人工筋の変位を高精度に制御することは難しい。一方、前章で導出した数学モデルは線形システム同定理論に基づいているため、このままでは人工筋のヒステリシスのような非線形特性を再現することができない。また、同定モデルの整合性を示す指標として式(2)に示す適合率が挙げられるが¹²⁾、システム同定により得られた人工筋モデルは高々80数%程度の適合率であり、この同定誤差は線形理論では表しきれないヒステリシス特性や飽和特性のような非線形要素が大きく影響していることが考えられる。

$$\text{Fit} = \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N [\hat{z}(k) - z(k)]^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N [z(k) - \bar{z}]^2}} \right) \times 100 \quad (2)$$

ただし、 $z(k)$ は実際の出力、 $\hat{z}(k)$ はモデルの出力、 $\bar{z}$ は実際の出力の平均値である。

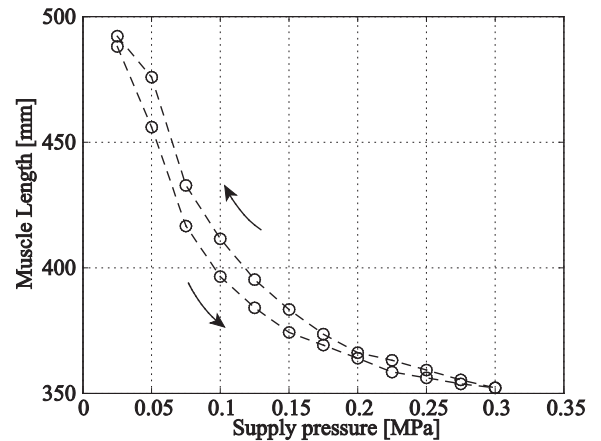


Fig. 5 Hysteresis of McKibben muscle

人工筋が有する非線形性のモデル化には、Maxwellすべりモデルを用いた人工筋モデル^{13),14)}、Preisachモデルを用いた人工筋モデル¹⁵⁾、実験的に導出した非線形人工筋モデル¹⁶⁾、摩擦に起因するヒステリシス特性を考慮した人工筋モデル¹⁷⁾、などが挙げられる。本研究では、ヒステリシス特性を記述可能なBouc-Wenモデルをシステム同定により

得られた人工筋モデルに適用し、人工筋のヒステリシス特性を陽に考慮した人工筋モデルについて考える。Bouc-Wenモデル^{18),19)}は種々のヒステリシス特性を表現することができるモデルとして知られ、MRダンパのモデル化などにも適用されている²⁰⁾。Boucにより提案されたモデルを基にして、新たにヒステリシスパラメータを付加することにより非対称なヒステリシス特性など従来のBouc-Wenモデルでは再現が困難なヒステリシス特性を持つ対象への適用も進められている²¹⁾。しかしながら、Fig. 5にみられるように人工筋の持つヒステリシス特性は比較的単純であり、従来のBouc-Wenモデルで十分に再現することができるため、ここではBoucおよびWenにより提案されたヒステリシスモデルを採用する。

まず、Bouc-Wenモデルについて、バネマスダンパ系を用いて説明する。ヒステリシス特性を有するバネマスダンパ系は次式のように表される。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + \Phi(x, y) = F(t) \quad (3)$$

ただし、 x は変位、 y は仮想ヒステリシス変数であり、 m , c , $F(t)$ はそれぞれ質量、粘性係数、外力である。このとき復元力を表す $\Phi(x, y)$ は、以下に示すように右辺第1項の弾性要素および右辺第2項のヒステリシス要素から構成される。

$$\Phi(x, y) = \alpha kx + (1 - \alpha)ky \quad (4)$$

ここで、 k は弾性係数、 α は重み係数であり、 $0 \leq \alpha \leq 1$ を満たすように選ばれる。なお、 $\alpha = 1$ と選ぶことで式(3)および式(4)はヒステリシス特性を持たないバネマスダンパ系となる。また、式(4)の仮想ヒステリシス変数 y は次式で与えられる。

$$\dot{y} = Ax - \beta |\dot{x}| |y|^{n-1} - \gamma |y|^n \quad (5)$$

上記の式(4)および式(5)で表されるBouc-Wenモデルは、 A , α , β , γ , n という5つのヒステリシスパラメータを持つ。 A はヒステリシスループの傾きを定めるパラメータの一つであり、 n はヒステリシス特性の局所的な線形もしくは非線形な振る舞いを表すパラメータ、 α は式(4)から分かるように対象のヒステリシスの強さを定めるパラメータである。また、 β および γ はヒステリシスループの形状を支配的に決めるパラメータであり、これらの組み合わせによりヒステリシスの形状が決定される²²⁾。

一方、本研究では人工筋のヒステリシス解析だけでなく、変位制御も目的の一つとなっているため、人工筋モデルが有界入力有界出力安定（以下、BIBO安定）となることは制御系設計の観点から重要であるが、ヒステリシスパラメータ A , β , γ に関してはTable 2に示す分類が提案されている²³⁾。これらの分類のうちClass IからClass IVは全てBIBO安定となるが、Bouc-Wenモデルの熱力学的許容性の必要十分条件を満たすためには、各パラメータをClass Iを満たすように選ぶ必要がある²⁴⁾。

Table 2 Classification of Bouc-Wen model

Class	Parameters
I	$A > 0$, $\beta + \gamma > 0$ and $\beta - \gamma \geq 0$
II	$A > 0$, $\beta - \gamma < 0$ and $\beta \geq 0$
III	$A < 0$, $\beta - \gamma > 0$ and $\beta + \gamma \geq 0$
IV	$A = 0$, $\beta + \gamma > 0$ and $\beta - \gamma \geq 0$
V	All other cases

5. ヒステリシスを考慮した人工筋モデル

システム同定により得られた人工筋の線形モデルである式(1)に、前章のBouc-Wenモデルを組み合わせた人工筋モデルを導出する。このとき、システム同定により得られた人工筋モデルは離散時間領域における数学モデルであるのに対し、Bouc-Wenモデルは連続時間領域におけるモデルであるため、Bouc-Wenモデルを離散化する必要がある。そこで、以下に示す前進差分近似を用いてBouc-Wenモデルの離散化を行う。

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(t+h) - x(t)}{h} = \frac{x(k+1) - x(k)}{h} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &\approx \frac{x(t+2h) - 2x(t+h) + x(t)}{h^2} \\ &= \frac{x(k+2) - 2x(k+1) + x(k)}{h^2} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 h はサンプリング間隔である。上記の前進差分近似を用いると、Bouc-Wenモデルは次式のように離散時間領域における表現に書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \dot{y} &= Ax - \beta |\dot{x}| |y|^{n-1} - \gamma |y|^n \\ \frac{y(k+1) - y(k)}{h} &= Ax(k) - \beta \left| \frac{x(k+1) - x(k)}{h} \right| |y(k)|^{n-1} \\ &\quad - \gamma |y(k)|^n \\ y(k+1) &= Ahx(k) - \beta |x(k+1) - x(k)| |y(k)|^{n-1} \\ &\quad - \gamma h |y(k)|^n + y(k) \end{aligned} \quad (8)$$

ついで、離散時間伝達関数 $G_w(z)$ で与えられている式(1)を状態空間表現に書き換える。

$$l(k) = 0.9356l(k-1) + 67.22p(k-1) \quad (9)$$

以上より、ヒステリシスを考慮した人工筋の同定モデルは以下で与えられる。

$$\begin{cases} l(k) = \Phi(k-1) + 67.22u(k-1) \\ \Phi(k-1) = 0.9356al(k-1) + 0.9356(1-\alpha)y(k-1) \\ y(k-1) = Ahl(k-2) - \beta |l(k-1) - l(k-2)| \\ \quad \cdot |y(k-2)|^{n-1} - \gamma h |y(k-2)|^n + y(k-2) \end{cases} \quad (10)$$

6. ヒステリシス計測実験

提案モデルの妥当性を調べるため、Fig. 1に示す実験装置を用いて検証実験を行った。本来、マッキベン型人工筋は1 MPa程度の圧力域まで使用することが可能であるが、

本研究で対象としている圧力域は水道水圧0.3MPa以下であるため、この圧力域に限定して実験および考察を行う。なお、Bouc-Wenモデルの5つのヒステリシスパラメータは、Table 2のClass Iを満たし、かつ実験結果と比較検討することにより試行錯誤的に決定した。決定した各ヒステリシスパラメータをTable 3に示す。なお、 $n = 1$ と選ぶことにより、式(11)で示した人工筋モデルは非常に簡単な形になる。これはBouc-Wenモデルにおける限定的なケースとなるが、BIBO安定性は保たれる²¹⁾。

Table 3 Identified hysteretic parameters of muscle model

Parameter	Value
A	1
α	0.9350
β	0.0040
γ	-0.0002
n	1

次に、ヒステリシスを考慮した人工筋モデルのシミュレーション結果と、ヒステリシス計測実験により得られた実験結果の比較をFig. 6に示す。実験では、人工筋上流側の圧力センサにより計測された供給圧力から、人工筋モデルを用いて推定された人工筋変位と、リニアポテンシオメータを用いて計測した実測値を比較している。なお、Fig. 6は両者のヒステリシスループを比較するため、供給圧力—人工筋変位特性を示している。システム同定により得られた人工筋モデルは、Fig. 4に示したように収縮時に大きな誤差が生じていた。これはヒステリシスループにおける上端部のずれを意味しており、加えて人工筋が収縮する際にも実験結果と比較して縮みにくいということが明らかとなった。一方、Bouc-Wenモデルを組み合わせた提案モデルは収縮時に同様に若干の誤差が生じているが、概ね実験結果と重なるヒステリシスループを描いており、Bouc-Wenモデルの各パラメータを適切に選ぶことで、従来の線形システム同定理論のみで導出した人工筋モデルと比較して人工筋のヒステリシス特性を十分に再現できることが示された。これまでに提案されている人工筋モデルでは、1) 人工筋物理パラメータの事前計測を必要とする、2) フィードフォワード制御を実現するため、実験データに基づく人工筋の特性解析を必要とする、3) モデルやパラメータの構造が複雑でパラメータ同定に多くの時間や知識を必要とする、といった実用上の問題点を有しており、比較的高い再現性を有している一方で実用において問題となる場合が多い。これに対し、提案モデルでは5つのパラメータを選ぶことでヒステリシス特性を再現できるため、システム同定に必要となる実験データを一度入手するだけで数学モデルを得ることができる。

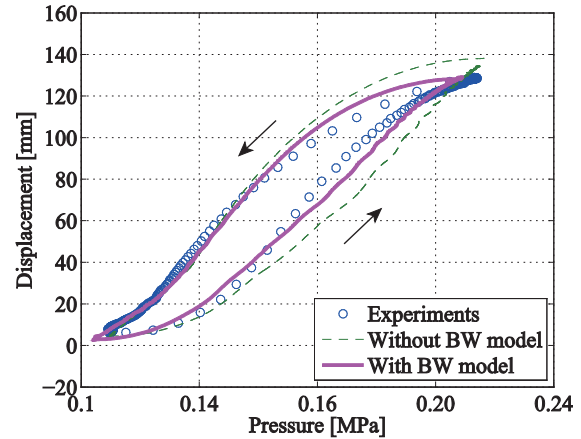


Fig. 6 Comparison of hysteresis loop of proposed models

7. 歩行訓練用人工筋モデル

本章では、人工筋の適用先を限定することで人工筋モデルの精度向上を図る。具体的には、水道水圧駆動マッキベン型人工筋の適用先として想定している水中歩行訓練補助装具のアクチュエータとして使用する人工筋の数学モデルについて考える。3章で述べたように、人工筋の動作範囲全てを同定するためには10sを超える長いサンプリング時間を必要とする。これは0.1Hz以下の低周波数領域における同定精度を重視しており、歩行訓練用人工筋モデルとして用いられる動作範囲を十分に保証するものではない。つまり、人工筋の駆動パターンを歩行訓練に限定した場合に必要となる周波数域は前述のものとは異なるため、本章では、実際に歩行訓練に用いられる歩行周期を基に歩行訓練用人工筋モデルを導出する。まず、同定実験のサンプリング周波数は、Table 4に示すように実際の歩行訓練におけるケデンスを参考に1Hzと設定した²⁵⁾。なお、サンプリング周波数を1Hzに設定することは、システム同定理論において、0.01~1Hzにおける同定モデルの精度を重視することに対応しており、歩行訓練において想定される歩行周期のほとんどがその信頼区間に入っていることを意味している。

Table 4 Cadence for gait-training [step/min]²⁵⁾

		Cadence [step/min]	Walking cycle [Hz]
Rehabilitation period	0-4 weeks	68	0.57
	4-8 weeks	89	0.75
	8 weeks -	106	0.88

同定に用いるモデルは3章のモデル化と同様ARXモデルとし、歩行訓練で必要とされる動作周波数域を含む同定入力を与えた。人工筋モデルは式(1)と同様に以下に示す離散時間1次伝達関数として得られた。

$$G_g(z) = \frac{11.56}{z - 0.9837} \quad (11)$$

得られた同定モデルにBouc-Wenモデルを組み合わせた提案モデルを式(12)に、パラメータを再チューニングした結果をTable 5にそれぞれ示す。

$$\begin{cases} l(k) = \Phi(k-1) + 11.56 u(k-1) \\ \Phi(k-1) = 0.9837 \alpha l(k-1) + 0.9837 (1-\alpha) y(k-1) \\ y(k-1) = A h l(k-2) - \beta |l(k-1) - l(k-2)| \\ \quad \cdot |y(k-2)|^{n-1} - \gamma h |y(k-2)|^n + y(k-2) \end{cases} \quad (12)$$

Table 5 Identified parameters for gait-training muscle model

Parameter	Value
A	0.8950
α	0.41
β	0.0039
γ	-0.0012
n	1

同定入力を与えた際の人工筋変位量におけるヒステリシスループをFig. 7, 8に示す。式(11)の同定モデルを用いたシミュレーション結果はヒステリシスを再現できていないことが分かる。一方、ヒステリシスパラメータを適切に選ぶことで、式(12)に示した提案モデルはヒステリシス特性を高精度に再現できている。Fig. 9は両モデルの時間応答を示したものである。

動作範囲を限定することで、同定モデル(11)も過渡応答をよく再現できているが、収縮時の定常特性に大きな誤差が生じている。提案モデル(12)ではヒステリシスループからも分かるように最大収縮時における定常値が十分に再現できており、より精度の高いモデルとなっている。システム同定により人工筋をモデル化する際には過渡応答が重視され

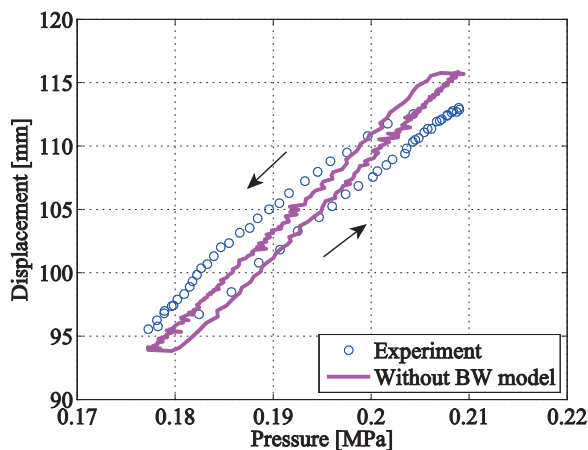


Fig. 7 Comparison of experiment and simulation (Identified model without Bouc-Wen model)

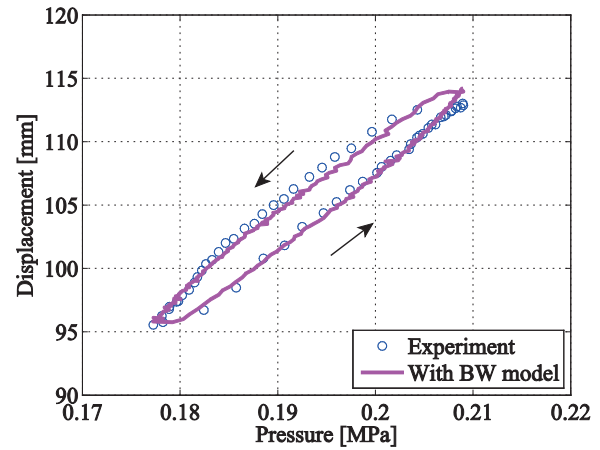


Fig. 8 Comparison of experiment and simulation (Identified model with Bouc-Wen model)

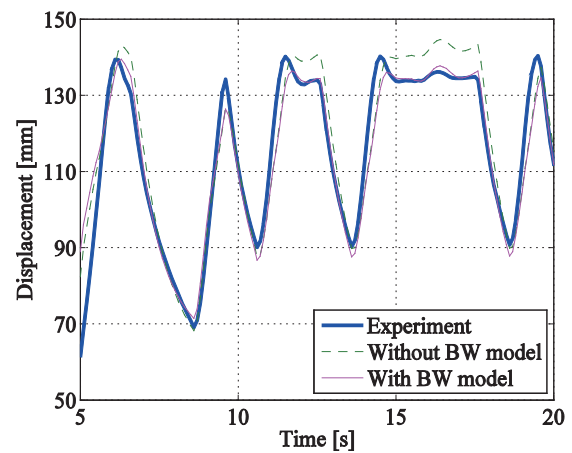


Fig. 9 Comparison of identified model without BW model and proposed model with BW model

るために飽和特性の再現が困難であったが、このように動作範囲を限定してモデルを導出することで、より精度の高いモデルが得られる。

8. 負荷に関する考察

ここまでの議論では、人工筋に負荷が接続されていない状態を扱ってきた。ベースとなる人工筋モデルは、文献⁷⁾で提案されているモデルとは異なり、システム同定により得られたものであるが、同様に高い再現性を有していることが示された。しかしながら、負荷が人工筋に与える影響は大きく、負荷を接続した際の提案モデルの整合性を確認することは不可欠である。そこで、人工筋下端部に負荷を接続し、有負荷状態での実験を行い、実験結果と比較することで提案モデルの妥当性について検証する。なお、負荷は人工筋下端部に接続され、自重により常に下向きに作用する (Fig. 1参照)。

8.1 有負荷実験 (人工筋モデル)

3章および4章において導出した提案モデルを対象とし、負荷が与える影響について実験により検証する。提案モデ

ルの各パラメータは、Table 3に示した無負荷時に同定したパラメータをそのまま用いている。Fig. 10に実験結果および提案モデルを用いたシミュレーション結果を示す。

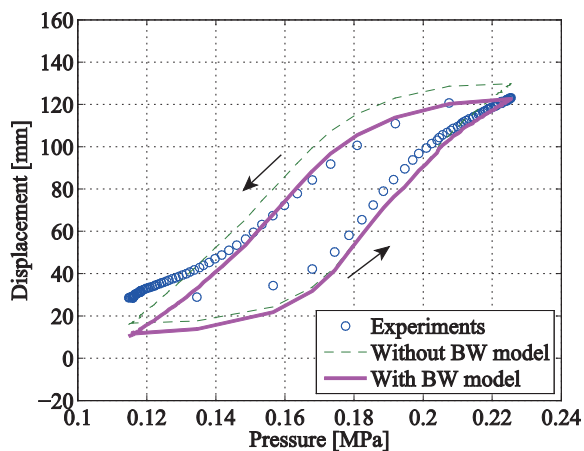


Fig. 10 Hysteresis analysis with load: 3.5kg

提案モデルによるシミュレーションでは、収縮時におけるヒステリシス特性を良く再現できている一方で、供給圧力が小さくなるほど精度が低くなっていることがわかる。これは、Fig. 11に示すように低圧力域になるほど負荷の影響が大きくなるためである。人工筋の動特性は供給圧力の動特性より遅く、伸長時にはインナーチューブの復元力と負荷および自重で動作するため、供給圧力を入力とする提案モデルでは、人工筋の自然長に近づくほど精度が低下したと考えられる。

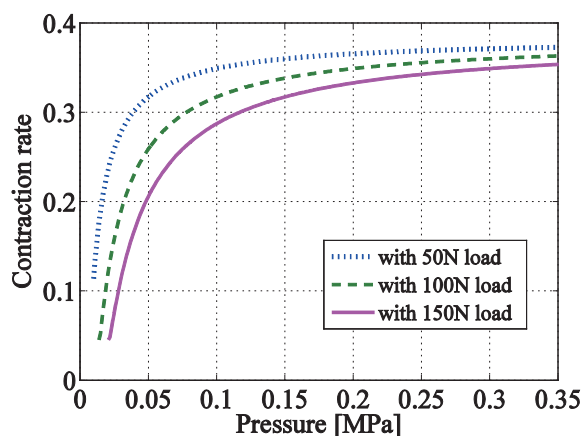


Fig. 11 Pressure - Contraction rate characteristics with loads

次に、より現実的な問題設定として負荷が変動した場合を考える。まず、3.5kgの負荷を接続した状態でパラメータ同定を行い、負荷を考慮した公称モデルを導出する。そして、人工筋に接続する負荷を7kgに変更した際に得られる応答と、人工筋モデルのシミュレーション結果を比較する。なお、再同定した各パラメータおよびシミュレーション結

果をそれぞれTable 6およびFig. 12に示す。Fig. 12には、比較のためBouc-Wenモデルを用いない人工筋モデルのヒステリシスループも示している。

Table 6 Re-identified parameters (load: 3.5kg)

Parameter	Value
A	0.965
α	0.98
β	0.063
γ	0.050
n	1

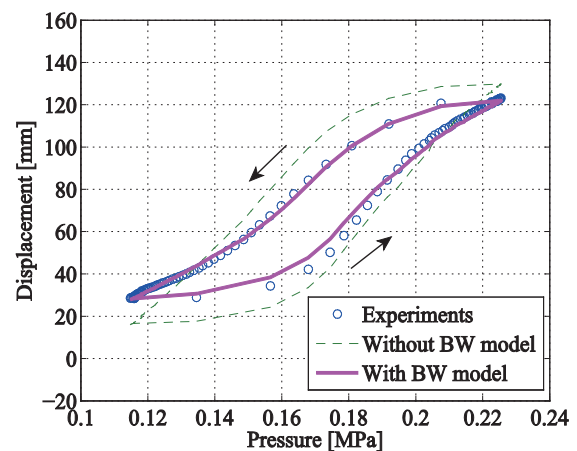


Fig. 12 Hysteresis analysis of re-identified muscle model

このように、Bouc-Wenモデルの各ヒステリシスパラメータを再同定することにより、実験結果と概ね一致する結果が得られる。ついで、再同定したモデルを用いて、負荷を7kgに変更した際の応答を比較する。Fig. 13は7kgの負荷を接続した際の実験結果および人工筋モデルによるシミュレーション結果を示している。

人工筋が伸長する際、無負荷状態ではインナーチューブ

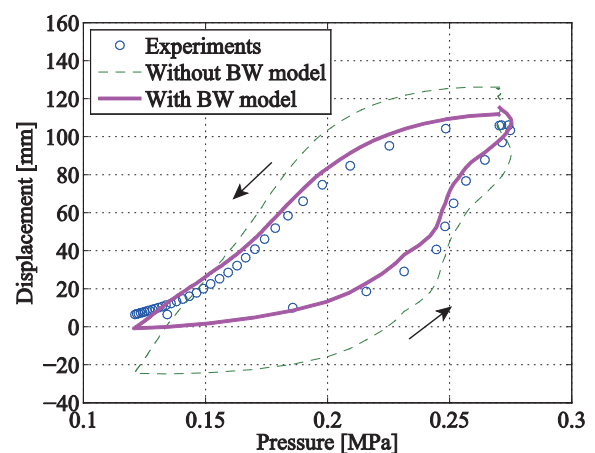


Fig. 13 Hysteresis analysis with load: 7 kg

の復元力が支配的であり、無負荷時に同定したパラメータでは有負荷時の応答を再現することが困難であった。これは、有負荷状態において伸張方向に作用する負荷の影響により伸張時の応答が改善されるため、モデルの入力となる供給圧力と出力の人工筋変位の関係が、無負荷時と比較して大きく変わるためである。この問題に対し、上記で示したように有負荷時にパラメータを再同定することにより、負荷が変動した場合においても高い精度でヒステリシスループが再現できる。言い換えると、無負荷時の入出力データに基づき同定モデルを導出するのではなく、有負荷状態における入出力データに基づいてシステム同定を行うことで負荷変動による影響を抑えることができる。このことから、Bouc-Wenモデルを用いた提案モデルは負荷の変動に関してある程度ロバスト性を有しているといえる。

8.2 有負荷実験（歩行訓練用人工筋モデル）

歩行訓練用人工筋モデルについて検証する。負荷は前節と同様3.5kgとし、ヒステリシスパラメータはTable 5のものを用いている。Fig. 14に実験結果および提案モデルを用いたシミュレーション結果を示す。なお、ここでは人工筋変位の時間応答を比較する。

負荷を接続した場合、システム同定により得られた人工筋モデルでは、定常応答だけでなく過渡応答においても実測値に対して誤差がみられる。また、全体的に時間遅れが生じている。したがって、負荷を接続することにより人工筋の収縮特性が変化し、無負荷時に同定したパラメータを用いた人工筋モデルでは実現象を十分に再現することができていない。一方、提案モデルでは過渡応答および定常応答ともに高精度に再現できている。負荷が人工筋に与える影響はFig. 11に示すように低圧力域になるほど大きく、特に0.1MPa以下の領域においてその影響は顕著である。0.1MPa以上の圧力域に注目すると負荷の影響は数%程度であり、ヒステリシスの影響と比較して小さい。つまり、比較的高い圧力域を使用する歩行訓練用人工筋モデルでは、

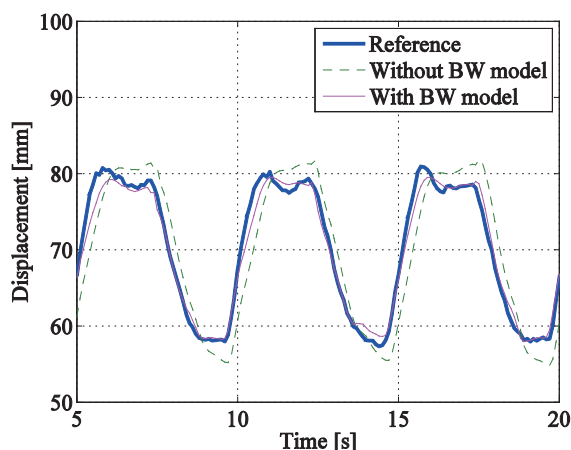


Fig. 14 Comparison analysis of proposed model with load: 3.5kg

ヒステリシス特性を考慮することで、負荷を接続した際にも無負荷時と同様に精度が向上したと考えられる。このように、実用化を図る上でヒステリシス特性を考慮することは効果的であり、Bouc-Wenモデルを用いることで直感的にパラメータ同定が行える人工筋モデルを構築できたことの意味は大きい。

9. 結 言

本論文では、ヒステリシス特性を考慮した人工筋モデルの導出手法としてシステム同定を用いる手法について述べた。線形システム理論により導出された人工筋モデルにヒステリシスモデルを組み込むことにより、人工筋の収縮特性に大きく影響する非線形要素を再現し、高精度な人工筋の数学モデルが得られた。なお、ヒステリシスモデルには種々のヒステリシス特性を記述可能なBouc-Wenモデルを用い、実験結果と比較検討し5つのヒステリシスパラメータを決定することで、人工筋の持つ非線形特性を十分に再現できることが示された。これは人工筋への供給圧力と人工筋変位の関係が1次システムとしてある程度記述することができ、広く用いられてきたヒステリシスモデルを容易に組み合わせることができたためである。また、有負荷状態での実験結果と比較することで、有負荷時における提案モデルの整合性を確認した。

一方、提案モデルは供給圧力のみで人工筋変位を得ることができるため、流量計と比較して安価に高性能なセンサが入手できる圧力データのみで人工筋の変位推定が可能となることは、実用性の観点から非常に有益である。具体的には、本研究で将来的な適用先としている水中歩行訓練補助装具において、装具の関節部などに直接ロータリーポテンシオメータやリニアセンサを用いる必要がなくなり、装具全体の小型軽量化も期待される。

今後の課題は、1) 提案モデルを用いたモデルベース制御を水道水圧駆動マッキベン型人工筋に適用し、その制御性能を明らかにすること、2) 負荷の有無や人工筋を構成するインナーチューブとナイロン製スリーブの経年劣化を考慮した、オンラインでの人工筋パラメータ同定手法を確立すること、などが挙げられる。

参 考 文 献

- 1) 小林宏：McKibben型人工筋肉を用いた人間を物理的に支援するロボット技術：マッスルスーツ、アクティブ歩行器：ハートステップの開発と今後の展開、日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 39, No. 6, p. 315-319 (2008)
- 2) Kobayashi, W., Ito, K.: Development of Gait-training Orthosis with Water Hydraulic McKibben Muscle, The 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, CD-ROM, OS2-02-2

- (2013)
- 3) 盛真唯子, 鈴森康一, 脇元修一, 神田岳文, 高橋正幸, 細谷高司, 竹松愛実: 水圧マッキベン型人工筋を用いた不定形重量物用ハンドの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 41, No. 3, p. 59-66 (2010)
 - 4) 中村太郎, 島村健史: 水圧駆動式ソフトアクチュエータの開発とその生物学的特性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1PSS-082 (2005)
 - 5) 小林亘, 伊藤和寿, P.B. Zobel, 池尾茂, 高橋浩爾: 水圧人工筋を用いた水中歩行訓練補助装具の股関節角度推定, 平成24年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 64-66 (2012)
 - 6) 小林亘, 伊藤和寿, 池尾茂: 水圧人工筋を用いた水中歩行訓練補助装具の股関節角度制御, 平成25年フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 58-60 (2013)
 - 7) Godage, S.I., Branson, T.D., et al.: Pneumatic Muscle Actuated Continuum Arms: Modelling and Experimental Assessment, IEEE int. conf. on Robotics and Automation, p. 4980-4985 (2012)
 - 8) Schulte, H.F. Jr.: The Characteristics of the McKibben Artificial Muscle, The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics. Washington, DC: Pub. 874, National Academy of Science-National Research Council, p. 94-115 (1961)
 - 9) Shen, X.: Nonlinear Model-based Control of Pneumatic Artificial Muscle Servo Systems, Control Engineering Practice, Vol. 18, No. 3, p. 311-317 (2010)
 - 10) 陳玳珩, 小山陽平, 尾崎伸吾, 小林宏: McKibben型アクチュエータの収縮に関する力学的検討, 日本機械学会論文集 (A編), Vol. 74, No. 739, p. 142-149 (2008)
 - 11) Kobayashi, W., Ito, K., Zobel, P.B.: Development of Gait-training Orthosis with Water Hydraulic McKibben Muscles, the proceedings of the 7th South East Asia Technical University Consortium, OS4.20 (2013)
 - 12) 足立修一: システム同定の基礎, 東京電機大学出版局, p. 27-29 (2009)
 - 13) Tri, V.M., et al.: A New Approach to Modeling Hysteresis in a Pneumatic Artificial Muscle using the Maxwell-slip Model, IEE/ASME transactions on Mechatronics, Vol. 16, No. 1, p. 177-186 (2011)
 - 14) Tri, V.M., et al.: Cascade Position Control of a Single Pneumatic Artificial Muscle-mass System with Hysteresis Compensation, journal of the International Federation of Automatic Control, Vol. 20, No. 3 p. 402-414 (2010)
 - 15) 小峯貴弘, 佐野学: ヒステリシスモデルに基づいた空気圧人工筋パラレルマニピュレータの制御, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 75, No. 759, p. 159-166 (2009)
 - 16) 香川利春, 藤田壽憲, 山中孝司: 人工筋アクチュエータの非線形モデル, 計測自動制御学会論文集, Vol. 29, No. 10, p. 1241-1243 (1993)
 - 17) Davis, S., et al.: Braid Effects on Contractile Range and Friction Modeling in Pneumatic Muscle Actuators, The international journal of Robotics Research, Vol. 25, No. 4, p. 359-369 (2006)
 - 18) Bouc, R.: Modèle Mathématique d'hystérésis, Acustica, Vol. 21, p. 16-25 (1971)
 - 19) Wen, Y.K.: Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, J Eng Mech. Div102 (EM2), p. 246-263 (1976)
 - 20) Soeiro, F.J.C.P., et al.: Stochastic and Hybrid Methods for the Identification in the Bouc-Wen Model for Magneto-rheological Dampers, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 135, No. 1, p. 1-9 (2008)
 - 21) Junho, S., Kiureghian, A.D.: Generalized Bouc-Wen Model for Highly Asymmetric Hysteresis, Journal of Engineering Mechanics, p. 610-618 (2006)
 - 22) Ikhrouane, F., Rodellar, J.: Systems with Hysteresis: Analysis, Identification and Control using the Bouc-Wen model, Wiley, p. 63-111 (2007)
 - 23) Ikhrouane, F. et al.: Dynamic Properties of the Hysteretic Bouc-Wen Model, Systems & Control Letters, Vol. 56, No. 3, p. 197-205 (2007)
 - 24) Erlicher, S., Point, N.: Thermodynamic Admissibility of Bouc-Wen Type Hysteresis Models, Comptes Rendus Mécanique, Vol. 332, No. 1, p. 51-57 (2004)
 - 25) Nakamura, R.: Walking Cycle after Stroke, Tohoku J Exp Med, Vol. 154, p. 241-244 (1988)

研究論文

油圧回路におけるポペット弁の振動現象* (弁振動とキャビテーション現象の関連性)

熊谷 賢人**, 龍 小平**, 太田 匡則***,
前野 一夫****, 鄒 俊*****

Vibration Phenomenon of Poppet Valve in Hydraulic System (Relationship between Poppet Valve Vibration and Cavitation Phenomenon)

Kento KUMAGAI, Shohei RYU, Masanori OTA,
Kazuo MAENO, Jun ZOU

Poppet valve is one of the most popular components in hydraulics, and it is also known as a trouble maker because it induces some unpredictable vibration in hydraulic system. In this research, thanks to the rapid development of visualization technology and digital simulation technology, we make a re-study on the well-known problem of unpredictable vibration phenomenon. Results show that; 1) stability of a poppet valve essentially depends on the components and parameters of the system, but the stability characteristics are influenced by the cavitation state at the downstream of the valve, 2) by changes in the compressibility of the hydraulic fluid with cavitation, frequency characteristics of the poppet valve are changed to unstable ones. Since the cavitation has complicated relations with various factors, the prediction of vibration of the poppet valve affected by cavitation is generally difficult. Therefore, the vibration may come out suddenly beyond prediction. The results of this paper can give a guide for the cavitation vibration of a poppet valve.

Key words : Poppet valve, Vibration, Cavitation, Bulk modulus, Digital simulation

1. 緒 言

ポペット弁は、油圧システムで圧力制御などに用いられる機器の一つであり、特に高圧力差を制御して稼働する建設機械においては、高い信頼性が求められる重要な構成要素である。しかし、ポペット弁はその構造上、振動騒音が発生しやすい性質をもち、周囲環境のわずかな変化によって予期せぬ振動が発生することがある。

ポペット弁の安定性についてこれまで多くの研究が行われてきた。初期の研究は線形の数値解析を基本として取り組み、Lutz¹⁾はポペット弁および直近油路を対象とした検討を行い、作動油の圧縮性による遅れが不安定化要因の一つであると報じた。その後、Backéら²⁾は上下流配管や周

辺機器の影響までを対象とした検討を行い、ポンプなどの他の構成要素との連成も要因の一つであるとした。また、前田³⁾は弁に作用する流体力が弁挙動に与える影響について論じた。さらに林ら⁴⁾⁵⁾はポペット弁の持つ強い非線形性の影響に着目し、弁と弁座との衝突を含む広範囲の系挙動検討を行い、ポペット弁の硬発振現象や不規則振動について報告している。だが、これらの研究を経てもポペット弁振動のメカニズムを完全に説明するには至っておらず、未だに予期せぬ振動騒音に頭を悩ます技術者は少なくない。

そこで本研究では、この予測困難なポペット弁振動が流れ場の圧力、温度、液種などの条件の変化で発生していることから、同じようにこれらの要素の変化に影響を受けるキャビテーション⁶⁾に着目し、ポペット弁振動とキャビテーションの関係を解明する。まず、ポペット弁の可視化実験装置と高速度カメラを用いてポペット弁挙動と流路状態の計測を行い、ポペット弁振動とキャビテーションの関係を明らかにする。同時に数値シミュレーションを用いて、キャビテーションの発生に伴う作動油の圧縮性の変化の影響について検討し、キャビテーションがポペット弁の振動に影響するメカニズムを研究する。

*平成26年5月8日 原稿受付

**日立建機株式会社

(所在地：茨城県土浦市神立町650)

(E-mail : k.kumagai@hitachi-kenki.com)

***千葉大学大学院工学研究科

(所在地：千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

****木更津工業高等専門学校

(所在地：千葉県木更津市清見台東2-11-1)

*****浙江大学機械電子制御工学研究所

(所在地：中国浙江省杭州市浙大路38)

2. 主な記号

A_{c_pv}	: バネ室圧力の作用面積 ($=\pi(d_{pv1}^2 - d_{pv3}^2)/4$)
A_{d_pv}	: 下流圧力の作用面積 ($=\pi(d_{pv2}^2 - d_{pv3}^2)/4$)
A_{u_pv}	: 上流圧力の作用面積 ($=\pi(d_{pv1}^2 - d_{pv2}^2)/4$)
$C_{d_pv; d_t}$	: ポペット弁, オリフィスの流量係数
$d_{pv1, pv2, pv3}$	: ポペットの各径
d_v	: 可変絞り弁のオリフィス直径
$d_{u, p, d, p}$	: 上下流配管の内径
E	: 管材の縦弾性係数
e_r	: 反発係数
$e_{u, p, d, p}$	: 上下流配管の肉厚
F_{ff}	: ポペットに作用する流体力
F_k	: バネ荷重
F_p	: ポペットに作用する圧力による力
F_r	: ポペットに作用する摩擦力
f	: 周波数
f_{pu}	: 上流圧力の支配的な脈動周波数
h	: ポペットとブロック間の隙間高さ
K_{eff1}	: 作動油と配管の等価体積弾性係数
K_{eff2}	: 気泡混入作動油の見掛けの体積弾性係数
K_f	: 作動油の体積弾性係数
K_g	: 気泡 (気体) の体積弾性係数 ($=14p_{abs}$)
k, m, n_i	: 定数
k_{pv}	: バネ定数
L_{c_pv}	: ポペットの摺動部長さ
$L_{u, p, d, p}$	: 上下流配管の長さ
$l_{u, p, d, p}$	: 上下流配管の単位長さ ($=L_{u, p, d, p}/n$)
m	: ポペット質量
n	: 配管の分割数
P_{abs}	: 圧力 (絶対圧)
P_{atm}	: 大気圧 (絶対圧)
P_{c_pv}	: バネ室の圧力
$P_{p, d, out}$	: 下流配管の出口側圧力
$P_{d_pv_ave}$	: ポペット弁下流の平均圧力
$P_{u_pv, d, pv}$	: ポペット弁の上下流圧力
$P_{u_pv_ave}$	: ポペット弁上流の平均圧力
P_{tank}	: 作動油タンクの圧力
$PS_{P, x, V}$	: パワースペクトル
p_{unit}	: 単位管路内の圧力
p_f	: 非定常層流圧力損失
$p_{in, out}$	: 単位管路の入口および出口圧力
$Q_{pv, tv}$	: ポペット弁及び絞り弁の通過流量
$Q_{u, in, d, out}$	: ブロックの流入および流出流量
q_{unit}	: 単位管路を流れる流量
$q_{in, out}$	: 単位管路への流入および流出流量
T	: 作動油温度

t	: 時間
V_{ci_pv}	: バネ室の初期体積
V_{SLM}	: 騒音計の出力
V_{u_pv, d_pv}	: 上流弁室および下流弁室の体積
x	: ポペット変位
$x_{g, g0}$	: p_{abs} および大気圧における気泡混入率
x_i	: バネの初期圧縮長さ
y_i	: 式(16)で定義される関数
α	: ポペットの円錐角
ΔP_{abs}	: 絶対圧と大気圧との差 ($=P_{abs} - P_{atm}$)
ΔP_{pv}	: ポペット弁の差圧
ΔP_{u_pv}	: 上流圧力脈動の全振幅
ν	: 作動油の動粘度
ρ	: 作動油の密度

3. 実験方法

3.1 実験装置

Fig. 1に実験システムを, Fig. 2に計測対象のポペット弁

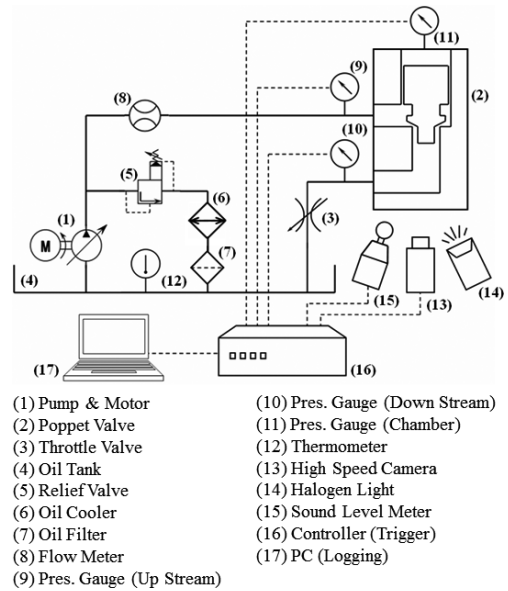


Fig. 1 Experimental System

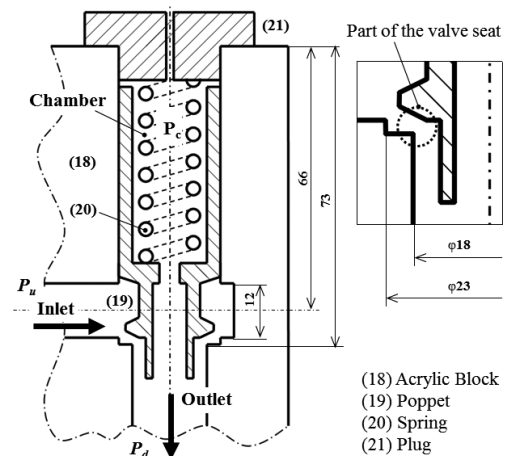


Fig. 2 Tested Poppet Valve

Table 1 Experimental Conditions

Quantity	Symbol	Value	Units
Differential Press.	$\Delta P_{pv}(=P_{u,pv}-P_{d,pv})$	1.75	MPa (Gauge)
Downstream Press. Ave.	$P_{d,pv,ave}$	0.05, 1	MPa (Gauge)
Flow Rate of Pump	Q_{pump}	0 ~ 50	L/min
Oil Temperature	T	40 ± 2	deg C
Kinetic Viscosity	ν	45.47	$\text{mm}^2/\text{s}@40 \text{ deg C}$
Oil Density	ρ	868.9	kg/m^3

を示す。装置は可変容量式アキシャルピストンポンプ（ピストン数9本，電動機回転数1500rpm）(1)，ポペット弁(2)，弁下流圧調整用の可変絞り弁(3)，作動油タンク(4)で主に構成され，各機器は油圧用ゴムホースで連結されている。ポペット弁は透明なアクリル樹脂製（PMMA）のブロック(18)，鉄製（S45C）の狭まり流れ形ポペット(19)，バネ(20)，プラグ(21)で構成されている。なお，アクリルブロックの弁座はシャープエッジ仕上げとなっており，弁座のポペットと平行な部分は無視できるほど小さいものである。

3.2 計測装置

ポペットの挙動は高速度カメラ（KEYENCE；VW-9000）(13)とメタルハライドランプ(14)によって計測され，撮影条件はフレームレート6000fps，シャッタースピード1/16,000msであった。騒音はポペット弁から200mmの位置に設置された精密騒音計（RION；NL-14）(15)で計測された。圧力は流入部(9)，流出部(10)，バネ室(11)の3箇所で圧力センサ（KYOWA；PGL-A-5MP-A）によって，流量はポペット弁上流で歯車式流量計（KRACHT；VG1BKP2S61）(8)によって，液温は作動油タンク(4)で温度計(12)によって計測している。高速度カメラ，騒音計，圧力センサはコントローラ(16)に接続され，トリガによって同期計測される。計測データはPC(17)に記録され，そこで高速度カメラの画像に画像処理を施すことでポペット変位が算出される。

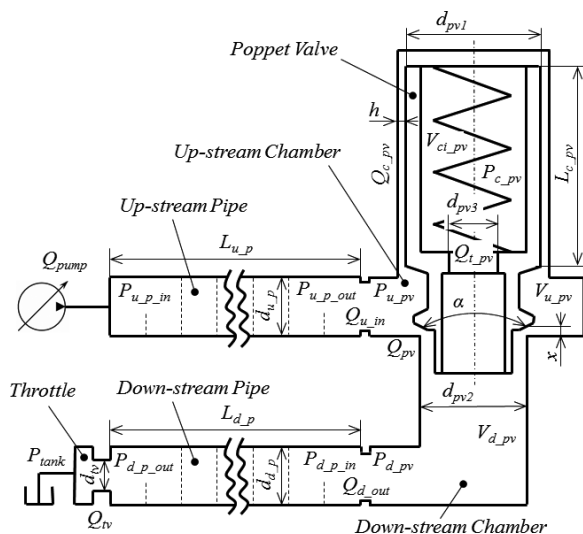


Fig. 3 Simulation Model

3.3 実験条件

Table 1に実験条件を示す。ポンプ流量 Q_{pump} は0 ~ 50L/minの範囲で10L/min間隔にセットされ，各流量条件で平均下流圧力 $P_{d,pv,ave}$ は0.05, 1 MPaにセットされた。なお，0.05 MPaは可変絞り弁(3)全開口時の圧力であり，流量に応じて0 ~ 0.1MPaの範囲で変化するが，便宜上，本報では平均をとり0.05MPaと称する。

4. 解析方法

4.1 基礎計算式

本解析で対象とする系はFig.3に示すように上流管路，上流弁室，ポペット弁，下流弁室，下流配管，可変絞り弁で構成される回路で，上流管路はポンプに接続されている。以下にこの系の動的挙動を導く方程式を記す。

まず，ポペット弁の運動方程式は式(1)で与えられる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_p - F_k - F_{ff} - F_r \quad (1)$$

ポペットに作用する圧力による力 F_p は式(2)で，ポペットに作用するバネ力 F_k は式(3)で，ポペットに作用する流体力 F_{ff} は式(4)で与えられる⁷⁾。

$$F_p = P_{u,pv} A_{u,pv} + P_{d,pv} A_{d,pv} - P_{c,pv} A_{c,pv} \quad (2)$$

$$F_k = k_{pv} (x + x_i) \quad (3)$$

$$F_{ff} = \rho Q_{pv} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{2|P_{u,pv} - P_{d,pv}|}{\rho}} \quad (4)$$

ここで， α はポペットの円錐角である。 Q_{pv} はポペット弁の通過流量であり，式(5)で与えられる。

$$Q_{pv} = C_{d,pv} \pi d_{pv2} x \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{2|P_{u,pv} - P_{d,pv}|}{\rho}} \times \text{sgn}(P_{u,pv} - P_{d,pv}) \quad (5)$$

ここで， $C_{d,pv}$ はポペット弁の流量係数， d_{pv2} は弁座直径であり， $\text{sgn}(P)$ は P の符号を表す。 $C_{d,pv}$ は，実験結果から算出した値を近似し，式(6)で表される。

$$C_{d,pv} = \begin{cases} 12.2 x & (0 \leq x < 0.05) \\ 0.0918 \log_e(x) + 0.885 & (0.05 \leq x < 0.4) \\ 0.8 & (0.4 < x) \end{cases} \quad (6)$$

ポペットに作用する摩擦力 F_r は式(7)で与えられる⁷⁾。

$$F_r = \rho \nu \frac{\pi d_{pv1} L_{c,pv}}{h} \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

ここで， ν は作動油の動粘度， d_{pv1} はポペット外径， $L_{c,pv}$ はポペット摺動部の長さ， h はポペットとブロック間の隙間高さである。上下流弁室に関する連続の式は式(8)で与えられる。

$$\frac{dP_{u,pv,d,pv}}{dt} = \left(\frac{K_f}{V_{u,pv,d,pv}} \right) (Q_{u,in,pv} - Q_{pv,d,out}) \quad (8)$$

ここで， K_f は作動油の体積弾性係数， $V_{u,pv,d,pv}$ は上下流弁室の容積， $Q_{u,in,d,out}$ はブロックの流入および流出流量である。可変絞り弁の通過流量 Q_v は，式(9)で与えられる。

$$Q_v = C_{d_t} \left(\frac{\pi d_{pv}^2}{4} \right) \sqrt{\frac{2|P_{d_p, out} - P_{tank}|}{\rho}} \times \text{sgn}(P_{d_p, out} - P_{tank}) \quad (9)$$

ここで、 $P_{d_p, out}$ は下流管路出口側の圧力、 P_{tank} はタンク圧力である。ポペット弁のバネ室に関する連続の式は式(10)で与えられる。

$$\frac{dP_{c_{pv}}}{dt} = \left(\frac{K_f}{V_{ci_{pv}} - A_{c_{pv}}x} \right) \left(A_{c_{pv}} \frac{dx}{dt} + Q_{c_{pv}} - Q_{t_{pv}} \right) \quad (10)$$

ここで、 $V_{ci_{pv}}$ はバネ室の初期体積であり、 $Q_{t_{pv}}$ はオリフィス直径 d_{pv3} 、バネ室圧 $P_{c_{pv}}$ 、下流圧 $P_{d_{pv}}$ を用いて式(9)で与えられる。 $Q_{c_{pv}}$ はポペットとブロック間の漏れ流量であり、隙間高さ h とポペット外径が $h \ll d_{pv1}$ の関係にある環状すきま流れの場合、式(11)で与えられる⁷⁾。

$$Q_{c_{pv}} = \frac{\pi d_{pv1} h^3}{12 \rho \nu L_{c_{pv}}} (P_{u_{pv}} - P_{c_{pv}}) \quad (11)$$

管路特性は、特性曲線法⁸⁾で計算を行った。管路内における作動油の連続の式は式(12)で与えられる⁷⁾。

$$\left(\frac{\pi d_{u_p, d_p}^2}{4 K_{eff1}} \right) \frac{dp_{unit}}{dt} \approx \frac{q_{in} - q_{out}}{l_{u_p, d_p}} \quad (12)$$

ここで、 p_{unit} は単位管路内の圧力、 d_{u_p, d_p} は上下流配管の内径、 l_{u_p, d_p} は上下流配管の単位長さ、 $q_{in, qout}$ は単位管路への流入および流出流量である。 K_{eff1} は作動油と配管の等価体積弾性係数であり、式(13)で与えられる⁷⁾。

$$K_{eff1} = \frac{K_f e_{u_p, d_p} E}{K_f d_{u_p, d_p} + e_{u_p, d_p} E} \quad (13)$$

ここで、 E は管材の縦弾性係数、 e_{u_p, d_p} は上下流配管の肉厚であり、 $e_{u_p, d_p} \ll d_{u_p, d_p}$ とする。管路内における作動油の運動の式は式(14)で与えられる⁷⁾。

$$\left(\frac{4\rho}{\pi d_{u_p, d_p}^2} \right) \frac{dp_{unit}}{dt} + p_f \approx \frac{p_{in} - p_{out}}{l_{u_p, d_p}} \quad (14)$$

ここで、 q_{unit} は単位管路を流れる流量、 p_{in}, p_{out} は単位管路の入口および出口圧力である。 p_f は単位長さの層流状態での圧力損失であり、式(15)で近似される⁹⁾。

$$p_f \approx \frac{128\rho\nu}{\pi d_{u_p, d_p}^4} \left(q_{unit} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k y_i \right) \quad (15)$$

ここで、第1項は定常項、第2項は非定常項、 k は定数である。 y_i は式(16)によって与えられる⁹⁾。

$$\frac{dy_i}{dt} = \frac{4n_i\nu}{d_{pu, pd}^2} y_i + m_i \frac{dq_{unit}}{dt} \quad (16)$$

ここで、 n_i, m_i は定数であり、その値は文献9)に示される。本報ではポペットと弁座との衝突も考慮する。衝突直前の弁速度を $dx/dt(t^-)$ 、衝突直後の弁速度を $dx/dt(t^+)$ とすると式(17)が成立する⁵⁾。

$$\frac{dx}{dt}(t^+) = -e_r \frac{dx}{dt}(t^-) \quad (17)$$

ここで、 e_r は反発係数であり、本実験装置の材料特性から取得した値を用いている。また弁下流部はシート部で発生したキャビテーションにより作動油に気泡が混入した状態になる。気泡が混入すると作動油の体積弾性係数は大きく変化するため、本報では式(18)で与えられる気泡が混入した作動油の見掛けの体積弾性係数 K_{eff2} ¹⁰⁾を弁下流部およびバネ室に適用し、その影響を考慮する。

$$K_{eff2} = \frac{K_f K_g}{K_g + x_g (K_f - K_g)} \quad (18)$$

ここで、 K_g は混入気泡中の気体を考慮した体積弾性係数であり、本論文では空気と同程度の物性を有していると仮定した。 x_g は絶対圧力 P_{abs} における作動油中の気泡（気体）混入率であり、式(19)で与えられる。

$$x_g = 1 - \frac{1}{1 + \frac{x_{g0}}{1 - x_{g0}} \times \frac{1 - \Delta P_{abs} / 1.4 P_{abs}}{1 - \Delta P_{abs} / K_f}} \quad (19)$$

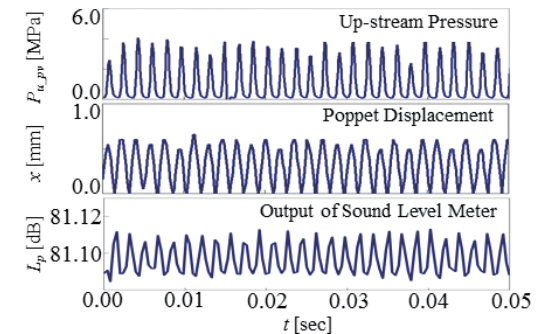


Fig. 4 Wave Form of Poppet Vibration

Table 2 Specification of parameters

Quantity	Symbol	Value	Units
Discharged Coefficient of Throttle	C_{d_t}	0.7	—
Inside Diameter of Down-Stream Pipe	d_{d_p}	19E-3	m
Diameter of Poppet Outside	d_{pv1}	23E-3	m
Seat Diameter of Poppet Valve	d_{pv2}	18E-3	m
Orifice Diameter of Poppet	d_{pv3}	3E-3	m
Inside Diameter of Up-Stream Pipe	d_{u_p}	12.7E-3	m
Young's Modulus of Pipe	E	0.6E+9	Pa
Thickness of Down-Stream Pipe	e_{d_p}	5E-3	m
Restitution Coefficient	e_r	0.035	—
Thickness of Up-Stream Pipe	e_{u_p}	3.5E-3	m
Clearance between poppet and block	h	0.1E-3	m
Bulk Modulus of Hydraulic Oil	K_f	1E+9	Pa
Spring Constant	k_{pv}	20E3	N/m
Length of Sliding Portion on Poppet	$L_{c_{pv}}$	28E-3	m
Length of Down-Stream Pipe	L_{d_p}	1	m
Length of Up-Stream Pipe	L_{u_p}	3	m
Mass of Poppet	m	0.1	kg
Partition Number of Pipe	n	20	—
Pressure of Tank (Gauge Pressure)	P_{tank}	0	Pa
Initial Volume of Spring Chamber	$V_{ci_{pv}}$	8E-6	m ³
Volume of Down-Stream Chamber	$V_{d_{pv}}$	55.6E-6	m ³
Volume of Up-Stream Chamber	$V_{u_{pv}}$	27E-6	m ³
Initial Shrinkage Length of Spring	x_i	11.9E-3	m
Cone Angle of Poppet	α	110	deg

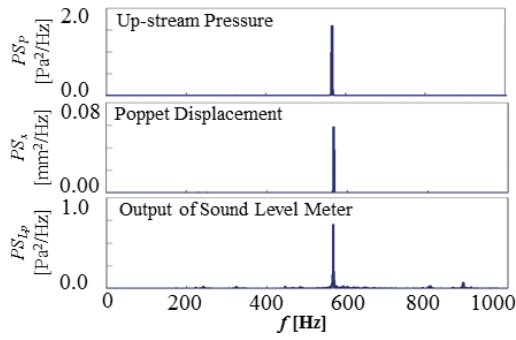


Fig. 5 Characteristic of Frequency

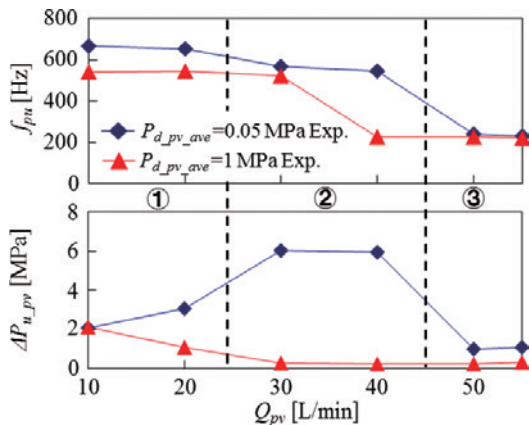


Fig. 6 Flow Rate vs. Frequency and Pressure Amplitude

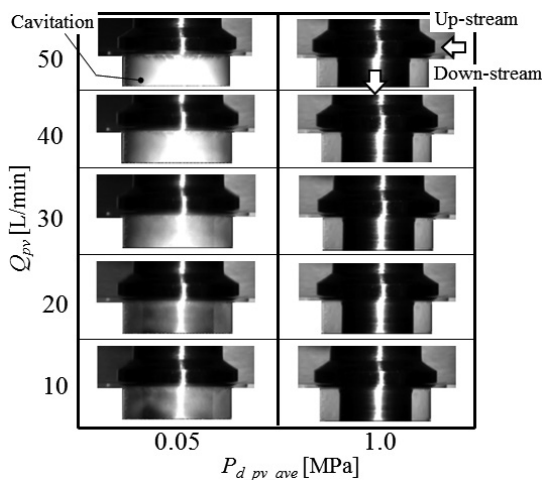


Fig. 7 State of Flow Field

ここで、 x_{g0} は大気圧における気泡混入率、 $\Delta P_{abs} = P_{abs} - P_{atm}$ である。式(1)～(19)はRunge-Kutta法によって計算され、計算にはTable 2に示す系諸元が用いられた。

4.2 計算条件

計算における流量は実験と同様 $Q_{pump} = 10 \sim 50 \text{ L/min}$ の範囲で10L/minごとに設定され、ポンプの圧力脈動も実験値相当(周波数225Hz, 圧力振幅 $0.06 P_{u,pv,ave} \sin(450\pi t)$)に設定された。ここで $P_{u,pv,ave}$ は上流圧の平均である。平均下流圧力 $P_{d,pv,ave}$ は0～0.1MPa(絞り弁最大開口時の圧力であり、流量により変動、以下、平均0.05MPaと表記)、1MPaに設

定された。また大気圧における作動油の気泡混入率 x_{g0} は0, 0.01, 0.1, 1%の4段階で設定した。

5. 実験および解析結果

5.1 バルブ挙動および流路の状況

Fig. 4は流量 $Q_{pv} = 30 \text{ L/min}$ 、平均下流圧力 $P_{d,pv,ave} = 0.05 \text{ MPa}$ での実験結果を示す。グラフは上から順に上流圧力 $P_{u,pv}$ 、ポペット変位 x 、騒音計の出力 V_{SLM} である。Fig. 5はそれらのデータをFFT分析した結果の比較である。Fig. 5によると Q_{pv} 、 $P_{d,pv,ave}$ 、 V_{SLM} は全て同じ振動周波数($f = 580 \text{ Hz}$)が支配的であり、これらは弁の振動に強い相関があることがわかる。

Fig. 6は条件 $Q_{pv} = 30 \text{ L/min}$ 、 $P_{d,pv,ave} = 0.05, 1 \text{ MPa}$ での実験結果を Q_{pv} に対する上流圧脈動の支配的な周波数 f_{pu} と全振幅 $\Delta P_{u,pv}$ で示したものである。条件 $P_{d,pv,ave} = 0.05 \text{ MPa}$ では、 Q_{pv} の増加につれて徐々に f_{pu} が660Hzから225Hzに減少し、 $\Delta P_{u,pv}$ は $Q_{pv} = 30, 40 \text{ L/min}$ でピークとなった。条件 $P_{d,pv,ave} = 1 \text{ MPa}$ では、540Hz($Q_{pv} = 10 \sim 30 \text{ L/min}$)と225Hz($Q_{pv} = 40, 50 \text{ L/min}$)の2種類の f_{pu} が確認され、 $\Delta P_{u,pv}$ は Q_{pv} の増加につれて徐々に減少し、 $Q_{pv} = 30 \sim 50 \text{ L/min}$ ではほとんど確認できなくなった。これらの結果から、この弁の振動は、弁の振動が発生する条件①、 $P_{d,pv,ave}$ に値によって振動有無が変化する条件②、弁挙動が安定する条件③の3条件で傾向が異なることが分かる。

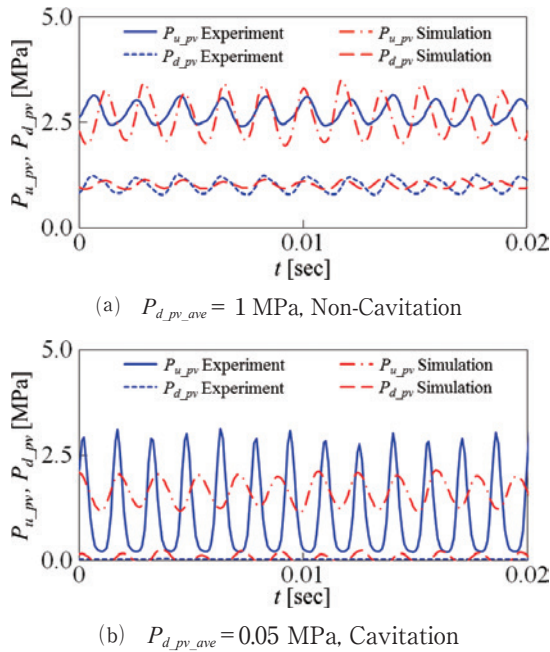
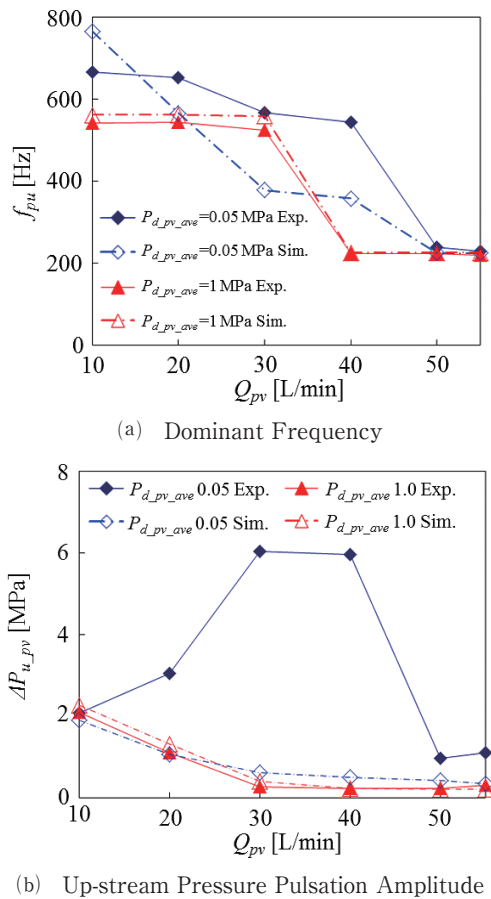
Fig. 7は各条件で撮影された流れの高速度可視化動画を静止画化し、さらに平均化処理を施したものである。画像中央の黒い部分はポペットであり、その下流の白い部分($P_{d,pv,ave} = 0.05 \text{ MPa}$)は、そこに大量のキャビテーション気泡が存在することを示している。また、透明な部分($P_{d,pv,ave} = 1.0 \text{ MPa}$)はキャビテーションが発生していないことを示す。

Fig. 6とFig. 7によって、弁下流のキャビテーションの発生状態に関係なく、条件①では弁が振動し、条件③では弁が安定しており、弁の安定もしくは不安定な領域で稼働していることがわかる。そして、条件①と条件③の間に位置する条件②ではキャビテーションの発生状態によって弁の安定不安定に違いが出ており、キャビテーションの影響を受けて弁の安定性が変化していることがわかる。

5.2 シミュレーションと実験の比較

ポペット弁の安定性に影響する要素は本実験で判明したキャビテーションの影響以外にも複数^{1)～5)}存在する。これらの要素とキャビテーションの影響とを分離するために、まず気泡の影響を考慮しない状態(気泡混入率 $x_{g0} = 0\%$)でシミュレーションを行い、その結果を実験と比較した。

Fig. 8 (a), (b)は流量 $Q_{pv} = 20 \text{ L/min}$ 、平均下流圧力 $P_{d,pv,ave} = 0.05, 1 \text{ MPa}$ の条件での実験および計算結果の上下流圧力 $P_{u,pv}$ 、 $P_{d,pv}$ を比較したものである。実験結果ではキャビテーションが発生する条件 $P_{d,pv,ave} = 1 \text{ MPa}$ と発生しない条件

Fig. 8 Wave Form of Pressure ($Q_{pv}=20\text{L/min}$, $x_{g0}=0\%$)Fig. 9 Comparison of Simulation and Experiment on Cavitation and Non-Cavitation conditions ($x_{g0} = 0\%$)

$P_{d,pv,ave} = 0.05\text{MPa}$ で圧力波形が異なっている。さらに条件 $P_{d,pv,ave} = 1\text{MPa}$ では計算結果が実験と近い波形を取るが、条件 $P_{d,pv,ave} = 0.05\text{MPa}$ では両者の結果が大きく異なった。

Fig. 9 (a), (b)は実験と計算の結果を Q_{pv} に対する上流圧脈

動の支配的な周波数 f_{pu} と全振幅 $\Delta P_{u,pv}$ で示し、比較したものである。条件 $P_{d,pv,ave} = 1\text{MPa}$ では Q_{pv} に対する f_{pu} と $\Delta P_{u,pv}$ の傾向も実験値と計算値がほぼ一致したが、条件 $P_{d,pv,ave} = 0.05\text{MPa}$ ではそれらの傾向は大きく異なった。

Fig. 6で確認された2種類の支配的な周波数のうち、225Hzはポンプの脈動周波数と一致する。もう一つの560Hzはポペットとバネの固有振動数72.1Hzとも異なるため、林らが報告した配管や作動油の圧縮性による自励振動と考えられる⁴⁾。

これらの結果から、実験で確認された3種類のケースのうち、流量が多く弁が安定する条件やキャビテーションの有無に関係なく振動が発生した条件に関しては、気泡の影響を考慮しなくても弁挙動をシミュレーションによって予測することができるが、キャビテーションの有無によって弁の安定性が変化する条件では弁挙動を再現できないことがわかる。

5.3 気泡混入率の影響

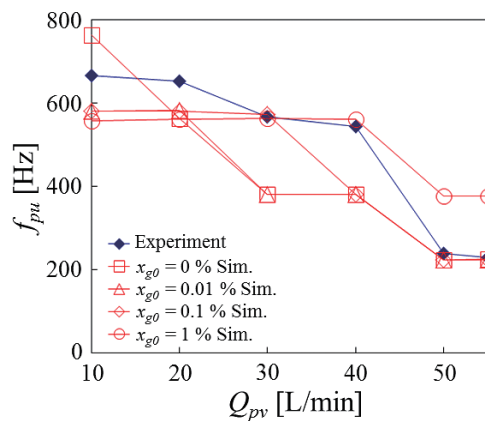
弁挙動に与えるキャビテーションの影響を調査するため、本研究では実験で多量のキャビテーション気泡が確認された下流弁室とポペットのバネ室の体積弾性係数にキャビテーションが発生し作動油に気泡が混入したという状態を仮定して、見掛けの体積弾性係数 K_{eff2} を設定し計算を行った。

Fig. 10(a), (b)は、実験結果と気泡混入率 x_{g0} ごとに計算した結果を Q_{pv} に対する上流圧脈動の支配的な周波数 f_{pu} と全振幅 $\Delta P_{u,pv}$ で示したものである。 x_{g0} を考慮すると $\Delta P_{u,pv}$ は増加する傾向を示し、その傾向は x_{g0} が増加するにつれて強くなった。さらに気泡の混入を考慮した条件では、気泡の混入を考慮していない $x_{g0} = 0\%$ の条件では再現することができなかった流量条件においても、実験値と近い値をとる場合を得た。同様に f_{pu} についても x_{g0} を考慮すると、 $x_{g0} = 0\%$ の条件よりも Q_{pv} に対する傾向が実験結果と似た傾向となった。

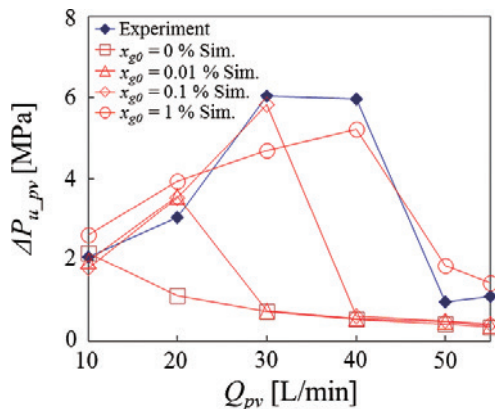
これらの結果から、気泡混入率 x_g を考慮した見掛けの体積弾性係数 K_{eff2} を導入し、キャビテーションによって発生した気泡が作動油へ混入した状態を考慮することにより、気泡混入率に応じて弁挙動が不安定になる条件が拡大し、気泡を考慮していない場合では再現することができなかった弁の振動現象をシミュレーションで算出することが判明した。Fig. 7で確認できるように、流量によってキャビテーション気泡の発生量は変化する。つまり、この変化に応じた気泡混入率 x_g を考慮することで気泡の影響による弁の振動を高い精度で再現することが可能となる。

6. 結 言

本報では、可視化実験装置を用いたポペット弁挙動の計測および弁挙動に及ぼすキャビテーションの影響に着目した数値シミュレーションを用いて、流体力や配管の影響だけでは予測困難であったポペット弁の振動現象の原因につ



(a) Dominant Frequency



(b) Up-stream Pressure Pulsation Amplitude

Fig. 10 Effect of Bubble Mixing Ratio

いて検討し、以下の結論を得た。

- (1) ポペット弁の通過流量や弁差圧が同じ条件であっても、下流部の圧力条件（ポペット弁下流部のキャビテーションの発生有無）の違いによって弁挙動が安定となる領域と不安定となる領域の境界が変化する領域が存在し、ポペット弁の振動の有無に違いがでることが実験によって明らかとなった。
- (2) ポペット弁の挙動予測に関する既知の理論式を用いてポペット弁の運動、作動油の圧縮性、配管の影響などを考慮した数値シミュレーションにより、流れ場が液体のみの状態となる条件では、ポペット弁の挙動を再現することが可能である。しかし、ポペット弁下流部にキャビテーションが発生している流れ条件において発生したポペット弁の振動現象は、これらの要素を考慮するだけでは予測できないことがわかった。

(3) このキャビテーションが発生している状態で発生するポペット弁振動現象は、キャビテーションの発生に伴い作動油中に気泡が混入したと仮定し、その状態を気泡混入率 x_g を用いた見掛けの体積弾性係数 K_{eff2} を導入して表すことで、その挙動を数値シミュレーションで再現可能であることが明らかとなった。

これらの結果から、ポペット弁の振動原因は、以前より知られていたポペット弁単体構造、周辺機器および配管の影響だけでなく、キャビテーションもまた主要因の一つであることを解明した。

参考文献

- 1) Lutz, O.: Die Vorgänge in federbelasteten Einspritzdüsen von kompressorlosen Ölmachinen, Ingenieur Archiv, Vol. 4, No. 2, p. 153-168 (1933)
- 2) Backé, W. and Rünneburger, M.: Zur Klärung des Verhaltens von Überdruckventilen, Industrie Anzeiger, Vol. 88, No. 98 p. 2107-2116 (1964)
- 3) Maeda, T.: Studies on the Dynamic Characteristic of a Poppet Valve, Bulletin of JSME, Vol. 13, No. 56, p. 281-289 (1970)
- 4) Hayashi, S.: Instability of Poppet Valve Circuit, JSME International Journal. Ser. C, Vol. 38, No. 3, p. 357-366 (1995)
- 5) Hayashi, S., Hayase, T. and Kurahashi, T.: Chaos in a hydraulic control valve, Journal of fluids and structures, Vol. 11, No. 6, 693-716 (1997)
- 6) 加藤洋治: キャビテーション [新版] 基礎と最近の進歩, 槇書店, (1999)
- 7) 社日本油空圧学会: 油空圧便覧 [新版], オーム社, (1989)
- 8) Zielke, W.: Frequency Dependent Friction in Transient Pipe Flow, Journal of basic engineering, Transactions of the ASME, Vol. 90, No. 1, p. 109-115 (1968)
- 9) 香川利治, 李一永, 北川能, 竹中利夫: 特性曲線法における非定常層流圧力損失の高速高精度計算法, 日本機械学会論文集 (B編), Vol. 49, No. 447, p. 2638-2644 (1983)
- 10) (一社)日本フルードパワー工業会: 実用油圧ポケットブック [2012年版], (一社)日本フルードパワー工業会, (2012)

日本フルードパワーシステム学会論文集 総目次 (第45巻)

【研究論文】

号 通し頁

出力圧力が高速で変更可能なアクチュエータの開発とその応用	芦 金石 留 滄海 齊藤 理人 大坂 一人 大場 孝一 北川 能	1	1	熱延ダウンコイラへの電気油圧サーボシステムの適用 (第2報) 入力操作に基づいた過渡特性の改善 - 新Posicast法の開発 -	桑野 博明	3	42
気体用超精密高速応答圧力レギュレータを用いたエアタービンスピンドルの回転数制御	加藤 友規 東嶋 元氣 矢澤 孝哲 大坪 樹 野崎 悠輔 田中 克敏	1	8	胸腔鏡下手術のための変形式肺ボジショナの開発 (吸着力向上とディスプレイ化のための設計製作)	宮本 寛之 高山 俊男 小俣 透 大泉 弘幸	4	51
局所加速度に基づく気体管路非定常層流圧力損失の計算法	中尾 光博	2	15	Friction Characteristics of Vane for a Balanced Vane Pump	Yoshiharu INAGUMA	4	58
斜板式アキシャルピストンモータに用いられるスリップのしゅう動部温度とすきま形状の同時計測	風間 俊治 鈴木 基司 鈴木 健太 成田 幸仁 桜井 茂行	2	22	熱延ダウンコイラへの電気油圧サーボシステムの適用 (第3報) 実機への新Posicast法の適用	桑野 博明	4	66
A Study on Vibrational Viscometers Considering Temperature Distribution Effect	Ali AKPEK Chongho YOUN Toshiharu KAGAWA	3	29	圧力変化法による容器の漏れ検査について (基礎的特性の研究)	土屋 順裕 ウーレイレイ 尹 鍾皓 香川 利春	5	73
CFDを用いたラビリンスシール空気圧シリンダ内の流れ解析 (第1報: 乱流モデルを用いた3次元流れ解析と漏れ量の推定)	小寄 貴弘 佐野 学	3	37	気泡除去装置の設計と評価に関する研究 (第2報 スパイラル係数を用いた放気口径と流出口径の選定)	坂間 清子 鈴木 隆司 田中 豊	5	79
				水道水圧駆動マッキベン型人工筋の変位制御 (第1報 人工筋のモデル化およびBouc-Wenモデルの適用)	小林 亘 伊藤 和寿	6	85
				油圧回路におけるポペット弁の振動現象 (弁振動とキャビテーション現象の関連性)	熊谷 賢人 龍 小平 太田 匡則 前野 一夫 郷 俊	6	94

〒105
|
0011 東京都港区芝公園三丁目五―三二 電話(〇三)三四三三―八四四一 FAX(〇三)三四三三―八四四二
編集兼発行人 一般社団法人日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇―一〇―三一―三三六九〇

東京都文京区小石川一―三―七
印刷所 勝美印刷株式会社